

Grado en Ingeniería Mecánica  
2018-2019

*Trabajo Fin de Grado*

# “Distribución de energía en concentradores secundarios Beam- Down”

---

Ángel Huertas Galdín

Tutor

Jesús Gómez Hernández

Leganés, 2019



## RESUMEN

Es indiscutible la importancia que están adquiriendo las energías renovables en la sociedad actual y las numerosas líneas de investigación, pruebas, inversión de capital y esfuerzo que están realizando las empresas y los países por adquirir estas formas de energía.

Este informe se centrará en detallar el estudio de una planta de energía termosolar Beam-Down desde diferentes puntos de vista. En primer lugar, se realizará una introducción al problema, seguido de una explicación de los fundamentos teóricos necesarios para comprender el proyecto. Seguidamente, se dimensionará la central estudiada basándose en una planta real, para finalmente realizar los cálculos pertinentes que permitirán realizar un estudio óptico y térmico, con su posterior análisis. Finalmente, se realizará un presupuesto, estudio socio-económico y se expondrán una serie de conclusiones.

Para todos los cálculos mencionados se utilizarán varios softwares informáticos: Matlab, SolTrace y Solid Edge ST10, los cuales serán presentados en un apartado concreto del informe para conocer qué función han desempeñado en el proyecto.

Con este informe se pretende detallar todo el procedimiento de cálculo con la mayor sencillez posible, los razonamientos que han llevado a esos procedimientos y las conclusiones que se han obtenido una vez han sido analizados los resultados.

Palabras clave: Beam-Down; energía termosolar de concentración; rendimiento; potencia térmica.



## **ABSTRACT**

The importance that renewable energies are acquiring nowadays and the large number of research lines, testing, capital investment and effort that the companies and countries are doing to obtain this kind of energy is so relevant.

This report will focus on detailing the study of a Beam-Down solar thermal power plant from different points of view. First, an introduction to the problem, followed by an explanation of the theoretical foundations which are necessary to understand the project. Next, will be dimensioned the solar plant based on a real plant, to finally make the pertinent calculations that will allow an optical and thermal study. Finally, it will be done a budget, a socio-economic study and a conclusion.

It will be used several computer software in order to obtain the results: Matlab, SolTrace and Solid Edge ST10, which will be presented in a specific section of the report.

The report aims to explain all the calculation process, the arguments followed and the conclusions that have been obtained when the results have been analyzed.

Keywords: Beam-Down; Concentrated Solar Power; efficiency; thermal power.



## **AGRADECIMIENTOS**

A Jesús, mi tutor, por el apoyo durante estos meses, su ayuda y su paciencia a la hora de atenderme cuando lo he necesitado.

A mis padres, mi hermano y el resto de la familia, por estar siempre ahí y preocuparse por mí.

A mis amigos de siempre y los amigos de la universidad por ayudarme a desconectar y compartir tantos momentos juntos.

Y a todas las personas que forman parte de mi vida.





## INDICE DE CONTENIDOS

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Masdar Institute .....	1
1.2. Energías renovables .....	2
1.3. Finalidad del proyecto .....	4
<b>2. Fundamentos teóricos .....</b>	<b>5</b>
2.1. Energía solar .....	5
2.1.1. Energía solar térmica.....	7
2.1.2. Energía solar fotovoltaica .....	7
2.1.3. Energía termosolar de concentración.....	8
2.2. Tipos de centrales y su funcionamiento.....	9
2.2.1. Campo de ptc .....	9
2.2.2. Plantas fresnel.....	10
2.2.3. Plantas disco-stirling .....	12
2.2.4. Plantas beam-down y con receptor central de torre .....	13
2.2.4.1. Plantas solares con receptor central de torre.....	14
2.2.4.2. Plantas solares beam-down.....	15
2.2.5. Resumen de las tecnologías.....	16
2.3. Programas utilizados.....	17
2.3.1. SolTrace.....	17
2.3.2. Solid Edge ST10.....	19
2.3.3. Matlab .....	20
<b>3. Estado tecnológico Beam-Down .....</b>	<b>21</b>
3.1. Masdar Beam-Down .....	21
<b>4. Metodología de cálculo.....</b>	<b>25</b>
<b>5. Cálculos y diseño .....</b>	<b>26</b>
5.1. Introducción.....	26
5.2. Diseño de la planta .....	26
5.2.1. Ubicación y análisis climatológico.....	26
5.2.2. Distribución y dimensiones de la planta.....	28
5.3. Orientación de los heliostatos .....	35

5.3.1. Reflexión de los rayos.....	35
5.3.2. Ángulos solares y del heliostato.....	36
5.3.3. Inclinação de los espejos.....	38
5.4. Hiperboloide de revolución.....	39
5.4.1. Introducción .....	40
5.4.2. Cálculo del hiperboloide de revolución .....	40
5.4.3. Polinomios de Zernike .....	40
5.5. Estudio óptico .....	41
5.6. Estudio térmico.....	42
6. Resultados .....	46
6.1. Introducción.....	46
6.2. Ángulos solares e inclinación de los heliostatos .....	46
6.3. Ajuste del hiperboloide de revolución .....	47
6.4. Dimensionalización final en SolTrace.....	49
6.5. Estudio óptico .....	54
6.6. Optimización dimensiones reflector secundario .....	57
6.7. Estudio térmico.....	59
7. Marco regulador.....	62
8. Entorno socio-económico .....	63
8.1. Presupuesto .....	63
8.2. Impacto socio-económico .....	65
9. Conclusiones .....	67
Bibliografía .....	68
Anexo .....	72



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación geográfica Masdar. Fuente: [2] .....	1
Figura 2: Masdar Beam Down. Fuente: [3].....	2
Figura 3: Variación del consumo energético mundial 2016 vs 2017. Fuente: [4].....	3
Figura 4: Porcentaje suministrado por cada energía primaria respecto al total. Fuente: [4] .....	3
Figura 5: Generación eléctrica en el mundo desde 1985 hasta 2017. Fuente: [4] .....	4
Figura 6: Relaciones entre la Tierra y el Sol. Fuente: [7] .....	5
Figura 7: Constante solar a lo largo del año. Fuente: [7] .....	6
Figura 8: Radiación directa, difusa y reflejada. Fuente: [8] .....	6
Figura 9: Esquema de una instalación solar térmica. Fuente: [10].....	7
Figura 10: Fotografía de paneles solares. Fuente: [12] .....	8
Figura 11: Sistema PTC. Fuente: [18].....	10
Figura 12: Rayos reflejados en una Planta Fresnel. Fuente: [20].....	11
Figura 13: Fotografía de una planta Fresnel. Fuente: [22] .....	11
Figura 14: Esquema Disco-Stirling. Fuente: [23] .....	12
Figura 15: Motor Stirling. Fuente: [23].....	13
Figura 16: Funcionamiento de una central solar con receptor central. Fuente: [16].....	14
Figura 17: Esquema central Beam-Down. Fuente: [16].....	15
Figura 18: Esquema del receptor central. Fuente: [16] .....	16
Figura 19: Ventajas y desventajas de los principales modelos de plantas de energía solar. Fuente: [16] .....	16
Figura 20: evolución del coste del kWh. Fuente: [16] .....	17
Figura 21: Gaussiana, Pillbox y definida. Fuente: [27].....	18
Figura 22: error de pendiente y especularidad de la superficie. Fuente: [27]. .....	19
Figura 23: Plataforma de mediciones. Fuente: [3] .....	21
Figura 24: Distribución de los heliostatos. Fuente: [3] .....	22
Figura 25: Fotografía de uno de los heliostatos. Fuente: [3].....	22
Figura 26: Reflector central. Fuente: [3] .....	22
Figura 27: Receptor de aceite. Fuente: [3] .....	23
Figura 28: Receptor de absorción directa. Fuente: [3] .....	23
Figura 29: FOE. Fuente: [3] .....	24
Figura 30: Temperaturas medias mensuales. Fuente: [28].....	26
Figura 31: Precipitaciones de Abu Dabi. Fuente: [28].....	27
Figura 32: Rango de temperaturas mensuales. Fuente: [28] .....	27
Figura 33: Precipitaciones mensuales. Fuente: [28].....	28
Figura 34: Masdar Beam-Down. Fuente: [3] .....	29
Figura 35: Vista global de la instalación. Fuente: propia. ....	30
Figura 36: Vista aérea de la instalación. Fuente: propia. ....	30
Figura 37: Vista lateral de la instalación. Fuente: propia. ....	31
Figura 38: Altura del vértice de la hipérbola. Fuente: propia.....	31
Figura 39: Diámetro del hiperboloide. Fuente: propia. ....	32
Figura 40: Vista lateral del heliostato. Fuente: propia. ....	32
Figura 41: Vista aérea del heliostato. Fuente: propia. ....	32
Figura 42: Distancia de los heliostatos con respecto al centro de la planta. Fuente: propia. ....	33
Figura 43: Ángulo de los heliostatos del primer radio. Fuente: propia. ....	33
Figura 44: Ángulos de los heliostatos del segundo radio. Fuente: propia. ....	34

Figura 45: Ángulo de los heliostatos del tercer radio. Fuente: propia.....	34
Figura 46: Sombra proyectada por los heliostatos. Fuente: [29].....	35
Figura 47: Ángulo de reflexión. Fuente: [29].....	35
Figura 48: Ángulos del heliostato y el sol. Fuente: [30] .....	36
Figura 49: Ángulo horario.....	37
Figura 50: Declinación. Fuente: [31] .....	37
Figura 51: Esquema para la obtención del ángulo del heliostato. Fuente: propia. ....	38
Figura 52: Representación gráfica de la normal. Fuente: propia.....	39
Figura 53: Hiperboloide de revolución. ....	40
Figura 54: Esquema de potencias de la central. Fuente: propia. ....	42
Figura 55: Esquema de resistencias térmicas del hiperboloide de revolución. Fuente: propia. ..	43
Figura 56: Balance de energía. Fuente: [35] .....	45
Figura 57: Representación hiperboloide de revolución. Fuente: propia.....	48
Figura 58: Ajuste del hiperboloide de revolución. Fuente: propia. ....	48
Figura 59: Representación de la central en SolTrace. Fuente: propia. ....	49
Figura 60: Simulación del impacto de 20 rayos. Fuente: propia. ....	50
Figura 61: Simulación del impacto de 50 rayos. Fuente: propia. ....	51
Figura 62: Simulación del impacto de 100 rayos. Fuente: propia. ....	52
Figura 63: Simulación del impacto de 500 rayos. Fuente: propia. ....	53
Figura 64: Mapa de flujo de calor del receptor. Fuente: propia. ....	54
Figura 65: Mapa de flujo de calor de un heliostato. Fuente: propia. ....	54
Figura 66: Variación de la potencia respecto al desplazamiento. Fuente: propia. ....	55



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensione de los heliostatos. Fuente: propia.....	28
Tabla 2: Dimensiones de la torre. Fuente: propia. ....	29
Tabla 3: Ángulos formados por el sol. Fuente: propia. ....	46
Tabla 4: Inclinação de los heliostatos. Fuente: propia. ....	47
Tabla 5: Datos para la dimensionalización del hiperboloide de revolución. Fuente: propia.....	47
Tabla 6: Resultados del estudio óptico. Fuente: propia.....	56
Tabla 7: Valores de los rendimientos para distintas excentricidades. Fuente: propia. ....	58
Tabla 8: Coste material del proyecto.....	63
Tabla 9: Coste de mano de obra del proyecto. ....	64
Tabla 10: Coste final. ....	65





# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Masdar Institute

The Masdar Institute of Science and Technology (Masdar Institute), fue una universidad centrada en el estudio de las energías renovables y la sostenibilidad que en 2017 se unió a otros dos organismos para crear la Universidad Khalifa, perteneciendo actualmente al Campus de la Ciudad de Masdar.

Masdar es una ciudad ecológica que empezó a construirse en 2008 con los siguientes objetivos en mente [1]:

- Generar el 100% de la energía necesaria a base de energía solar.
- No generar residuos, aprovechando el 99% de estos mediante la reducción, reutilización y reciclado.
- Apostar por un sistema de transporte subterráneo que funcionaría mediante energía renovable, pudiéndose desplazar en la superficie andando o en bicicleta.

La ciudad pretende cumplir más requisitos sostenibles relacionados con la alimentación, agua, empleo de materiales sostenibles, etc. pero los puntos anteriormente mencionados son los más relevantes. De esta manera, es lógico que Masdar Institute trabaje tan estrechamente con el desarrollo de esta ciudad.

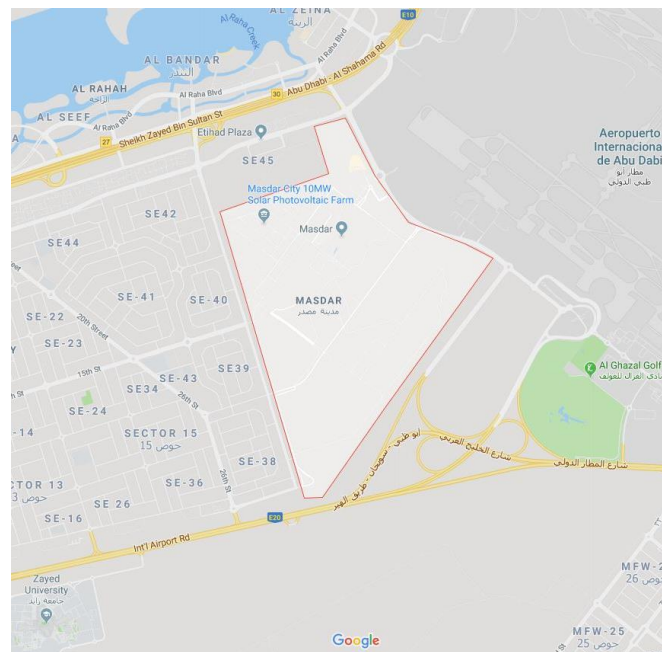


Figura 1: Ubicación geográfica Masdar. Fuente: [2]

El presente proyecto se centrará en una instalación de energía renovable llevada a cabo por Masdar Institute, destinada a la investigación y al desarrollo de la energía solar. Consiste en una configuración Beam Down (figura 2), con una potencia de 100KW adaptada a fines analíticos. En los siguientes apartados se explicará más detenidamente el funcionamiento de este tipo de centrales junto con las características de la misma.

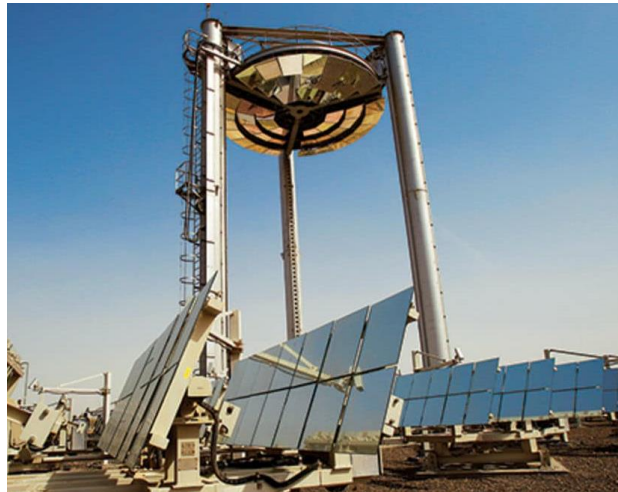


Figura 2: Masdar Beam Down. Fuente: [3]

Como esta es una central dedicada a la investigación, los datos obtenidos con los análisis realizados pueden ser de utilidad para otros proyectos en desarrollo. Es el caso de la investigación llevada a cabo por Tatsuya Kodama [38], propone tres configuraciones de centrales Beam-Down en las cuales se usarían  $H_2O$ , carbón o gas natural en el receptor, buscando obtener  $H_2$  y  $CO$ , usándose este último como combustible.

Las temperaturas necesarias son diferentes para cada una de las configuraciones, de esta manera, con esta planta se podrían hacer pruebas para ver la eficacia de este proyecto y ver los resultados que se obtendrían.

## 1.2. Energías renovables

Es importante la relevancia que han cobrado las energías renovables en los últimos años y como, poco a poco, el porcentaje cubierto por estas sigue creciendo.

Los últimos datos proporcionados por BP en el artículo *BP Statistical Review of World Energy 2018* [4] reflejan esta realidad (figura 3) pudiendo observarse el incremento de las energías renovables en un 17% con respecto al año anterior. Cabe destacar que, en todos los datos presentados, la energía hidroeléctrica aparece como una fuente de energía independiente, aunque está considerada como una energía renovable.

### Variación del consumo de energía 2016 vs 2017



Figura 3: Variación del consumo energético mundial 2016 vs 2017. Fuente: [4]

En cuanto al porcentaje cubierto por cada energía primaria, con respecto al total consumido durante el año a nivel mundial, los resultados arrojados son los recogidos en la figura 4. Aunque las energías tradicionales siguen ocupando la mayor parte del gráfico, cabe destacar que las energías renovables (sumando renovables e hidroeléctrica) proporcionan el 10,4% del total de las fuentes primarias, algo impensable hace unos años.

### Mix de energía primaria en 2017

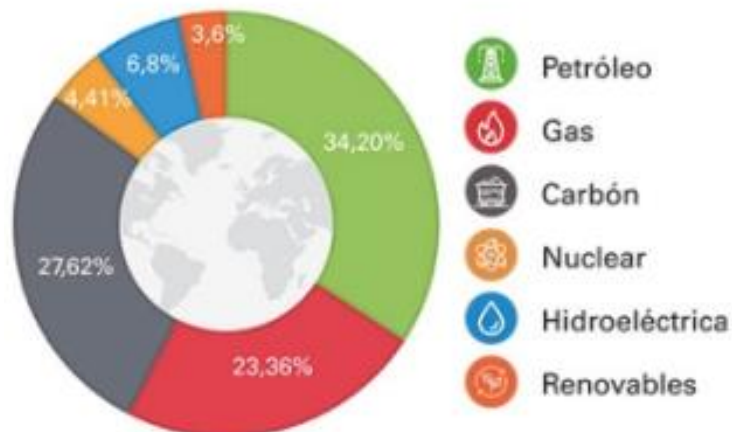


Figura 4: Porcentaje suministrado por cada energía primaria respecto al total. Fuente: [4]

Finalmente, en la figura 5 se puede apreciar el crecimiento de las energías renovables desde el año 1985 hasta el 2017 y su rápido ascenso en los últimos 8 años.

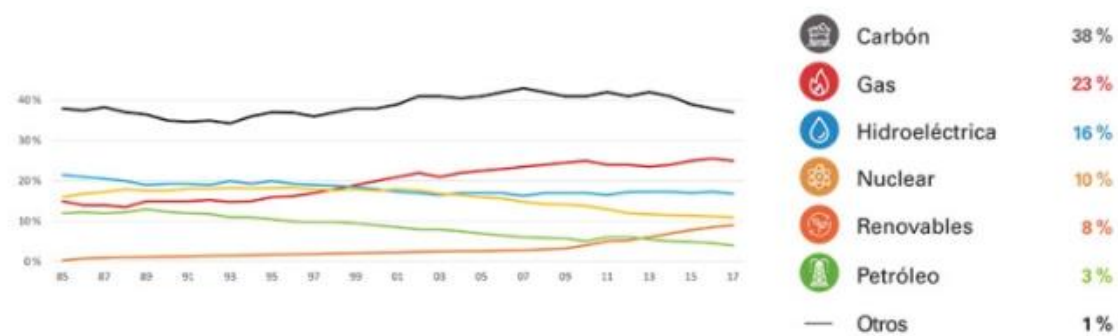


Figura 5: Generación eléctrica en el mundo desde 1985 hasta 2017. Fuente: [4]

Por tanto, con los datos mostrados en este apartado no es de extrañar el interés mostrado por Abu Dabi, al igual que otras ciudades y países del mundo, hacía las energías renovables y la sostenibilidad del medio ambiente, ya que la idea a largo plazo es poder suministrar la mayor parte de la energía mundial a base de energías limpias y sin emisiones.

Tanto es así que, como se recoge en el periódico digital “*El correo del Golfo*” [5], Abu Dabi tiene como objetivo para 2020 que el 7% de la energía generada provenga de fuentes renovables. A parte, en su “Estrategia de Energía Limpia 2050” tienen como meta aumentar el porcentaje mencionado con anterioridad a un 25% en 2030 y un 75% en 2050.

### 1.3. Finalidad del proyecto

Una vez entendido el pretexto por el cual se ha creado la planta de Masdar y la importancia que están adquiriendo las energías renovables, es necesario entender que el objetivo del proyecto es caracterizar la planta mencionada para futuras aplicaciones industriales o de investigación, como el proyecto de Tatsuya Kodama mencionado con anterioridad.

Para ello, en primer lugar se realizará un diseño aproximado de la planta para poder realizar dos enfoques: estudio óptico y estudio térmico.

- Estudio óptico: debido a la situación de la planta y el clima desértico, es normal que las rachas de viento azoten la instalación o que se produzcan errores de montaje debido al factor humano. Por esta razón, se ha creído conveniente realizar un estudio del rendimiento de la instalación debido a estas variaciones.
- Estudio térmico: como se observará más adelante, las temperaturas en esta zona del planeta son elevadas durante la mayor parte del año, siendo las precipitaciones y los días nublados prácticamente inexistentes. Por esta razón, se pretende ver las temperaturas que se pueden alcanzar en el espejo del reflector secundario.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Energía solar

La energía solar es una de las energías renovables más utilizadas, la cual aprovecha la radiación solar para producir energía eléctrica o térmica según el modelo con el que se esté trabajando y que se explicará posteriormente.

La radiación solar que llega a la Tierra es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol, es decir, una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan por el vacío transportando la energía [6]. Es el producto de las reacciones de fusión nuclear que se dan en esta estrella y que produce una pérdida de masa que se transforma en energía.

Aunque visto desde la Tierra, el Sol tiene un ángulo de arco de 32' (figura 6), se suele usar como simplificación que la radiación solar directa llega como un haz de rállos paralelos.

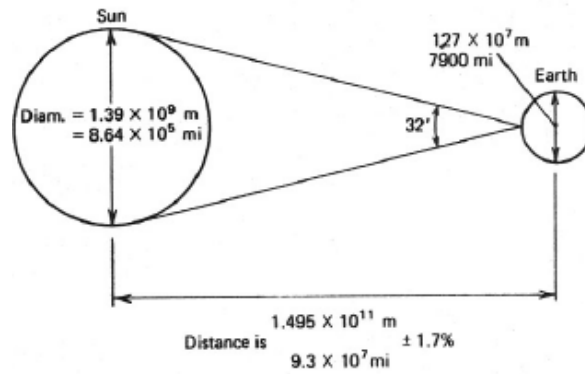


Figura 6: Relaciones entre la Tierra y el Sol. Fuente: [7]

Según Duffie and Beckman, la constante solar se puede definir como “energía solar media recibida por unidad de tiempo y de superficie, perpendicular a su dirección de propagación y situada fuera de la atmósfera a la distancia media entre la tierra y el sol.”

De esta manera, la constante solar queda recogida en la ecuación 1 y permite observar en la figura 7 la variación de la radiación a lo largo del año.

$$G_{0n}(n) = 1367 \cdot \left( 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365} [\text{deg}]\right) \right) \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (1)$$



Figura 7: Constante solar a lo largo del año. Fuente: [7]

Cabe destacar que dentro de la radiación global que llega a la superficie terrestre, se pueden diferenciar tres tipos de radiación como se puede ver en la figura 8 [8]:

- Radiación directa: proviene directamente del sol, es la que se aprovecha para la obtención de energía.
- Radiación reflejada: es aquella que rebota sobre la superficie terrestre y es aprovechada en un menor porcentaje.
- Radiación difusa: es la radiación que llega dispersa por culpa de las nubes, partículas en suspensión u otros obstáculos, no se puede aprovechar por su trayectoria impredecible. En días despejados suele ser un 15% de la radiación global, en días nublados en los que la directa disminuye, la difusa predomina.

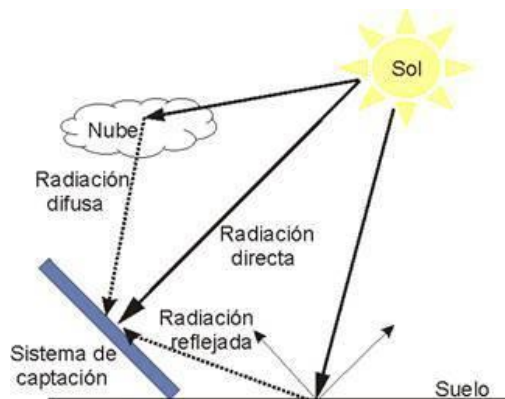


Figura 8: Radiación directa, difusa y reflejada. Fuente: [8]

Finalmente, es conveniente hablar de los beneficios que se pueden obtener de la energía solar [9]. Es inagotable, renovable y, por lo tanto, no contaminante, lo que evita el calentamiento global y el uso de combustibles fósiles, genera riqueza y empleo local, contribuye al desarrollo sostenible y es muy versátil pudiéndose adaptar a generación eléctrica a gran escala o para pequeñas aplicaciones.

A continuación, se procederá a explicar las distintas formas de energía solar y que las hace diferentes a cada una.

### 2.1.1. Energía solar térmica

La energía solar térmica surge con la idea de aprovechar la energía del sol para calentar un fluido, el caso más generalizado es el de agua caliente sanitaria, disminuyendo también las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Mediante el uso del esquema presentado en la figura 9, se procederá a entender el funcionamiento de este tipo de instalaciones [10]. Para empezar, la radiación solar impactará sobre el colector o panel solar y gracias al circuito hidráulico, el fluido que circula por el interior se calentará. Hay que distinguir entre circuito primario, que se encuentra unido al panel solar, y el circuito secundario, que será el que pase por el acumulador. El fluido caliente del circuito primario calentará el fluido del circuito secundario mediante la acción de un intercambiador de calor. Finalmente, el agua ya caliente se almacenará en el acumulador lista para su consumo, mientras el agua fría proveniente de la red se introducirá en el circuito secundario para ser calentado de nuevo.

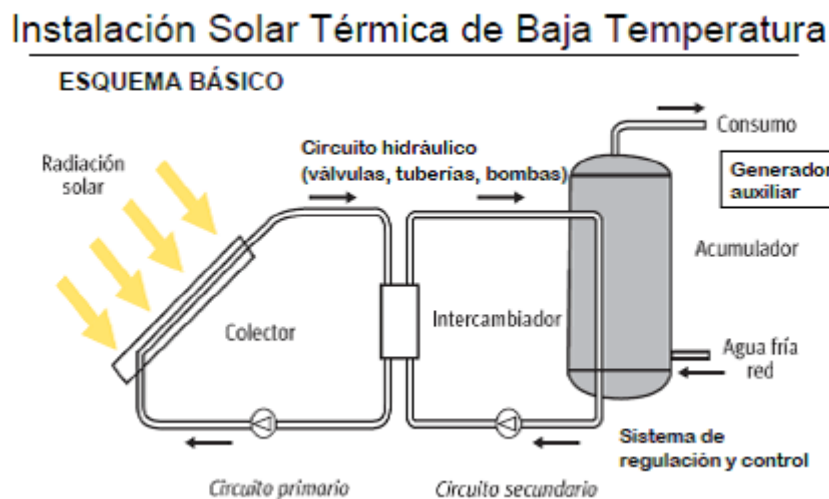


Figura 9: Esquema de una instalación solar térmica. Fuente: [10]

Es conveniente destacar que en este tipo de instalaciones es necesario añadir un equipo de energía auxiliar para los días o épocas del año en los que no se pueda calentar el agua mediante la radiación solar. Normalmente se usan calderas para esta operación.

### 2.1.2. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es otra de las posibles configuraciones de energía solar disponibles. Su función es transformar la energía proveniente del sol en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, siendo necesario el uso de paneles solares [11].

Los paneles solares (figura 10), están formados por unas células fotoeléctricas que son las que permiten que, mediante un diferencial de potencial eléctrico entre las caras, se genere un movimiento de electrones que produce la electricidad buscada.





Figura 10: Fotografía de paneles solares. Fuente: [12]

En cuanto a las ventajas y desventajas que presenta este sistema destacan [13]:

#### Ventajas

- Costes de operación muy bajos.
- Mantenimiento sencillo y barato.
- Vida media de 20 años.
- Fácilmente instalable en cualquier edificio.

#### Desventajas

- Requieren una gran inversión inicial.
- Dependiente de las condiciones meteorológicas.
- Problemas de almacenamiento de energía.

### **2.1.3. Energía termosolar de concentración**

El último tipo de energía solar del que se va a hablar es el modelo que usa la planta solar que se va a estudiar en el presente proyecto. Según Greenpeace International [14], esta tecnología podría llegar a abastecer hasta el 25% de las necesidades energéticas de la población mundial.

Este tipo de instalaciones aprovecha la radiación directa del sol, concentrando los rayos sobre una superficie muy pequeña tras una serie de reflexiones [15]. Estos rayos producen calor, que a su vez acciona una turbina de vapor, con la que se genera la electricidad.

Hay que realizar una distinción entre la energía termosolar de concentración CSP y la electricidad fotovoltaica de concentración CPV. La CSP utiliza el calor producido por los rayos para generar electricidad, mientras CPV convierte la luz solar directamente en energía eléctrica.



## 2.2. Tipos de centrales y su funcionamiento

En este punto del informe, se hablará con detenimiento de los distintos modelos de centrales solares que utilizan la energía termosolar de concentración y el funcionamiento específico de cada una de ellas. Existe una primera clasificación atendiendo al sistema de concentración que presentan, dentro de las cuales se encontrarán los diferentes modelos de planta solar [16]:

- Concentración lineal: la radiación solar se concentra en un receptor lineal, alcanza temperaturas inferiores a las de los otros modelos debido a tener menos grados de libertad para hacer el seguimiento solar.
  - Plantas solares Fresnel.
  - Campo de PTC o cilindro-parabólica.
- Concentración puntual: en este caso la radiación solar se concentra en un mismo punto orientando todos los espejos hacia él. Se alcanzan temperaturas superiores a las de los campos de concentración lineal.
  - Disco-Stirling.
  - Centrales Beam-Down.
  - Receptor central de torre.

En cuanto al porcentaje de uso de cada una de ellas [17], se puede ver que la más usada es la PTC (94%), seguida de Disco-Stirling (3%), Beam Down y receptor central en torre (2%) y Fresnel (1%).

### 2.2.1. Campo de PTC

Es una metodología usada desde los años 80 por lo cual es la más extendida de todas las tipologías de planta termosolar de concentración. Esta configuración consta de un sistema de seguimiento para conseguir que la orientación del reflector sea siempre perpendicular a la radiación solar, como se puede apreciar en la figura 11.

El funcionamiento básico de esta tecnología consiste en reflejar los rayos del sol mediante unos espejos cilindro-parabólicos, los cuales están diseñados para que impacten sobre el tubo absorbedor que se encuentra en el centro de la estructura. Estos pueden tener una longitud entre 600 y 800 metros, dependiendo de las características de la planta. A continuación, una vez el fluido se encuentra a temperatura suficiente, se hace pasar por un intercambiador de calor para obtener vapor sobrecalentado, con el cual se generará energía eléctrica mediante una turbina de vapor y un generador [18].

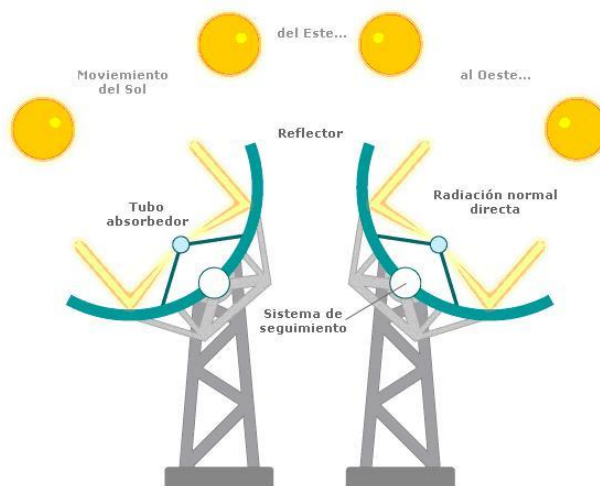


Figura 11: Sistema PTC. Fuente: [18]

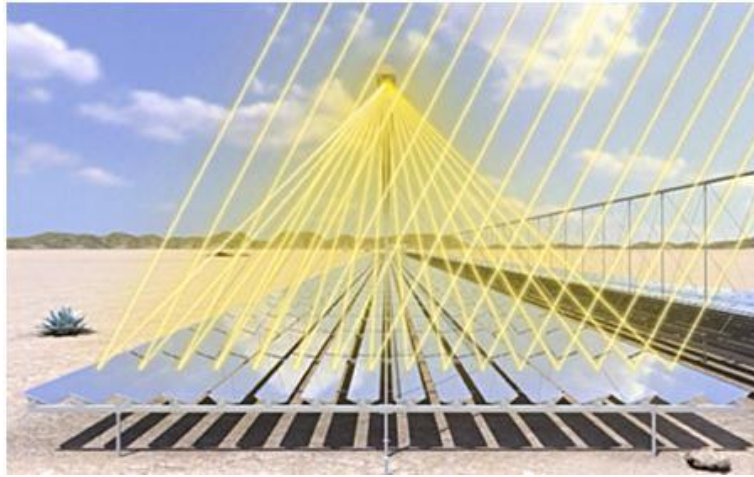
El tubo receptor está recorrido por un elemento transmisor de calor, normalmente un fluido orgánico sintético (HTF) compuesto por un 26,5% de óxido de difenilo y un 73,5% de bifenilo [19]. El fluido entra a una temperatura de unos 290 °C, incrementándose a lo largo del recorrido hasta alcanzar 400 °C.

Aunque a mayor temperatura, mayor será el rendimiento de la planta, esta está limitada a 400 °C porque con valores más altos se originan hidrocarburos volátiles y pesados que provocan problemas de seguridad, siendo necesario sistemas especiales que eliminen los posibles productos originados en el aumento de la temperatura.

### 2.2.2. Plantas Fresnel

Este tipo de central de energía solar destaca por su facilidad de construcción y su bajo coste en comparación con otros tipos de plantas. Su configuración y funcionamiento son parecidos al modelo PTC explicado con anterioridad, pero la diferencia reside en la disposición y forma de los espejos.

Mientras las PTC constan de un único espejo cilindro-parabólico con un receptor lineal en su parte superior, las plantas Fresnel constan también de un receptor lineal, pero están acompañadas de un conjunto de espejos planos que reflejan los rayos al receptor, como se puede observar en la figura 12.



*Figura 12: Rayos reflejados en una Planta Fresnel. Fuente: [20]*

Esta disposición de los espejos permite que la superficie abarcada sea mayor, además de poder orientarse individualmente cada fila con respecto a la posición del sol ofreciendo un mayor número de rayos reflejados.

La forma de los espejos en la configuración PTC hace que sean un 15% más eficientes que los espejos Fresnel [20]. Por otro lado, las segundas suelen usar espejos de vidrio normales, haciéndolos más baratos. Además, como el absorbedor no es móvil y los espejos se encuentra a nivel del suelo, se elimina la carga de viento y se facilitan las tareas de mantenimiento.

Aunque la producción de electricidad en las plantas PTC y las Fresnel son similares, se puede encontrar una diferencia notable. Debido al sistema fijo del absorbedor, es posible adaptar la planta a varios tipos de fluidos [21] como aceite térmico, agua o sales fundidas. En el caso de usar agua, el vapor es generado de manera directa y, por esta razón, es posible prescindir del intercambiador de calor facilitando y abaratando el montaje. Gracias a las sales fundidas, se puede realizar un almacenamiento de la energía térmica para producir electricidad en momentos en los que energía solar no sea suficiente.



*Figura 13: Fotografía de una planta Fresnel. Fuente: [22]*

En el caso de usar calderas solares de agua sobrecalentada, se emplean tubos de absorción de vacío, los cuales permiten que se genere vapor sobrecalentado a una gran presión, pudiéndose obtener una temperatura de 500°C frente a los 400°C de la configuración anterior, traducándose en una mayor eficiencia en la transformación de energía solar a eléctrica.

### 2.2.3. Plantas Disco-Stirling

Este tipo de planta de energía solar pertenece al modelo de energía de radiación puntual ya que, a diferencia de las otras dos ya estudiadas, este tipo de planta concentra los rayos reflejados en un solo punto.

Al igual que el resto de modelos, el funcionamiento básico de la planta es reflejar los rayos provenientes del sol, mediante una primera reflexión, a un receptor puntual que absorberá el calor y la transferirá al motor Stirling, figura 14.

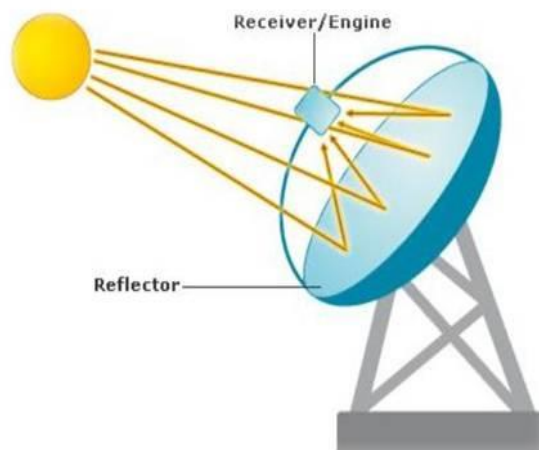


Figura 14: Esquema Disco-Stirling. Fuente: [23]

Los principales componentes [23] de este tipo de sistemas son:

- Concentrador: es el lugar dónde se produce la reflexión de los rayos, haciéndolos impactar en el receptor. Los materiales usados para esta estructura suelen ser: metal para la estructura y vidrio para los espejos. La geometría adecuada para este elemento es un paraboloide de revolución. Esta estructura cuenta con un sistema de seguimiento para poder orientarse correctamente según la posición del sol.
- Receptor: situado en el centro de la estructura se encarga de recoger los rayos reflejados y enviarlos al motor en forma de calor, evitando en lo posible las pérdidas, para la posterior actuación del motor con el que se obtendrá la energía eléctrica.
- Motor Stirling: se trata de un motor que trabaja con ciclos de calor. Su funcionamiento consiste en calentar un gas, con el calor procedente de la

radiación solar, para que este se expanda y transforme la energía térmica en mecánica. Los gases usados son helio o hidrógeno, lo cual evita los ruidos producidos en los motores convencionales por la explosión de los combustibles fósiles. La degradación también es menor y se trabajan con presiones entre 50-200 bar y la temperatura del foco caliente será el máximo permitido por los materiales, normalmente entre 650-800°C.

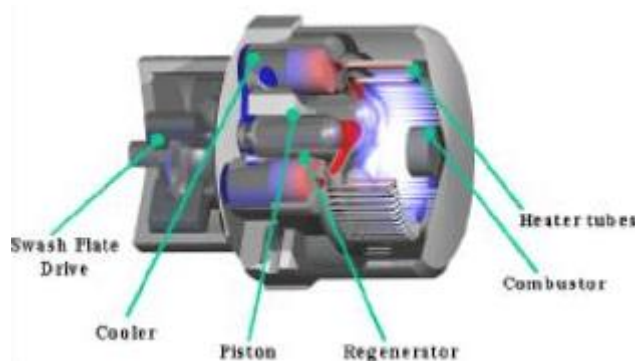


Figura 15: Motor Stirling. Fuente: [23]

Una vez se han visto las partes y el funcionamiento de este tipo de centrales, se va a proceder a hablar del apartado técnico y las comparaciones con los otros sistemas estudiados.

El rendimiento de este tipo de instalaciones [24] está en torno al 30%, mientras que el resto de plantas solares obtienen un 15-16%. La principal razón por la que su uso no está más extendido, a pesar de estos valores de rendimiento, se debe a que no es posible almacenarlos de manera eficiente, suministrando la energía de manera similar a la fotovoltaica. Como esta últimas resultan más económica, fiable y están más extendidas, son la primera opción elegida entre los consumidores.

Además, a nivel estructural también existen problemas para sostener la estructura y poder orientarla de manera correcta en dirección al sol, incrementando su coste y su complejidad de construcción y mantenimiento.

#### **2.2.4. Plantas Beam-Down y con receptor central de torre**

Dentro de las centrales de tipo torre se pueden encontrar dos configuraciones: receptor central de torre y Beam-Down. Ambas tienen un funcionamiento muy similar, los rayos procedentes del sol impactan en el campo de heliostatos, los cuales tienen una orientación e inclinación variable con la hora del día para aprovechar el máximo de radiación solar posible, provocando una primera reflexión hacia la zona superior de la torre. A partir de este punto, comienzan las diferencias entre estos dos modelos.

### 2.2.4.1. Plantas solares con receptor central de torre

En este primer tipo, los rayos de la primera reflexión impactarán en el punto 3 mostrado en la figura 16, conocido como receptor de haz de luz. Consiste en una serie de tubos por los que circula un fluido de captación, que puede ser vapor, aire o sales fundidas, siendo estos últimos los que mejores resultados proporcionan. En esta zona, la energía térmica del sol calentará las sales fundidas, incrementando su temperatura cerca de los 565°C [16].

A continuación, el fluido caliente viajará hasta un tanque donde se almacenará hasta que sea necesario su uso. Del tanque de sales caliente, pasará a un intercambiador de calor para generar vapor de agua, que gracias a una turbina y un generador producirá energía eléctrica. Las sales que han cedido su calor al agua en el intercambiador regresarán a la torre y se almacenarán en un segundo tanque para, posteriormente, volver a iniciar el ciclo. La temperatura de salida del tanque frío es aproximadamente 288°C.

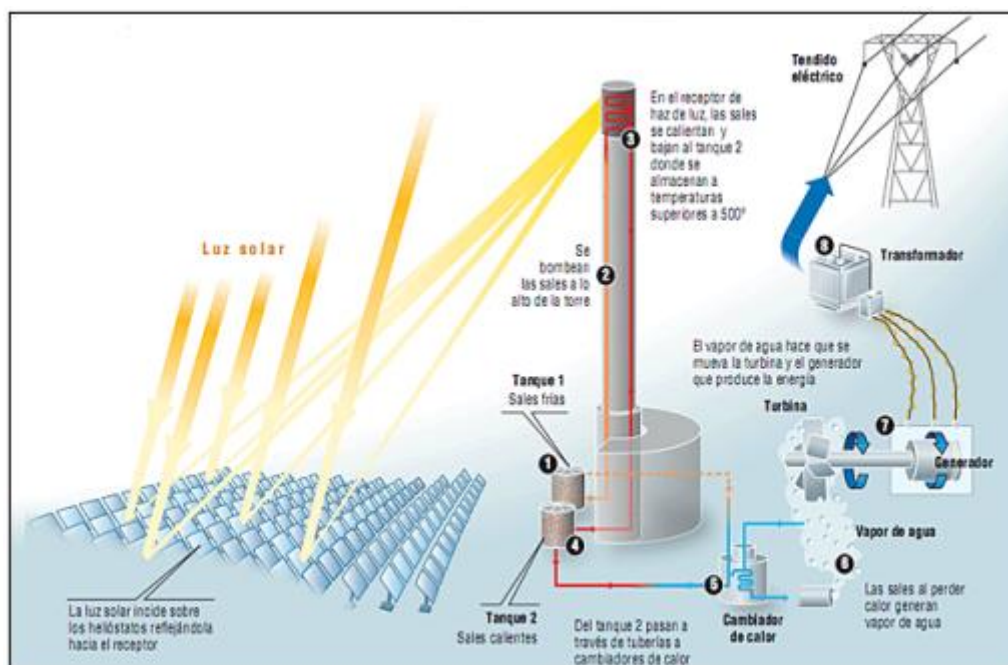


Figura 16: Funcionamiento de una central solar con receptor central. Fuente: [16]

La mezcla de sales que se usan en este tipo de plantas suele ser 60%  $\text{NaNO}_3$  y 40%  $\text{KNO}_3$  debido a los buenos resultados que proporcionan [25]. La razón por la cual el fluido es liberado de nuevo al circuito a una temperatura de 288°C es por su elevado punto de congelación, situándose este a 223°C y haciendo que sea necesario mantener el fluido por encima de esta temperatura en todo el proceso.

El tanque de almacenamiento de las sales frías se fabrica de acero al carbono y el tanque de almacenamiento de las sales calientes con acero inoxidable. Las paredes y la parte superior de los tanques se aíslan con lana mineral y bloques de silicato cálcico.



La combinación de sales mencionada comienza su descomposición a una temperatura cercana a los 565°C, por esta razón, no es posible su contacto directo con la radiación procedente de la primera reflexión, la cual superar ampliamente esta temperatura. Por esta razón, la parte superior de la torre se construye con superaleaciones de níquel.

#### 2.2.4.2. Plantas solares Beam-Down

A diferencia de la configuración explicada anteriormente, una vez se produce la primera reflexión procedente de los heliostatos, los rayos solares son reflejados de nuevo hacia el receptor, el cual se encuentra en el suelo, tal y como se puede apreciar en la figura 17.

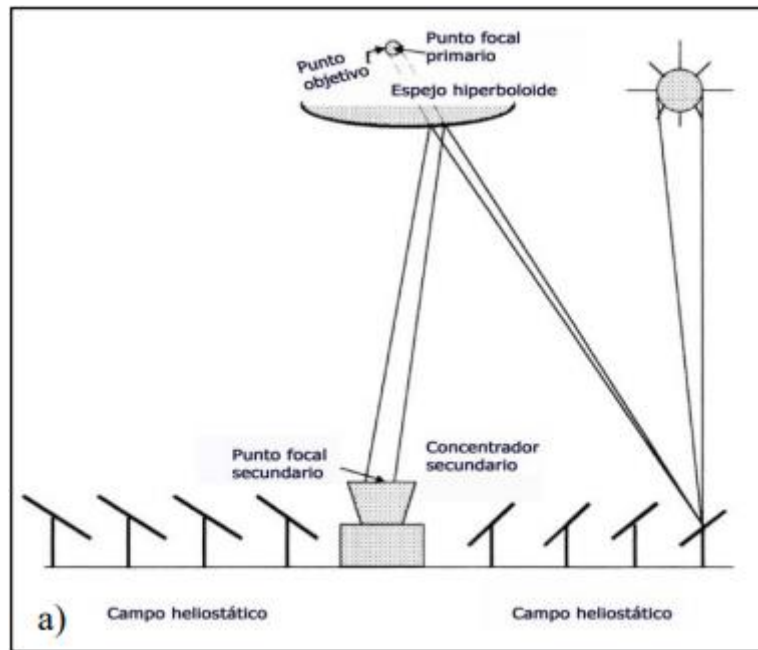


Figura 17: Esquema central Beam-Down. Fuente: [16]

Para esta segunda reflexión, es usual utilizar un espejo con forma de hiperboloide de revolución, aunque como se verá en el caso estudiado en este proyecto, también existe la posibilidad de usar múltiples espejos para la segunda reflexión. Esto se conoce como concentrador primario o reflector secundario.

Seguidamente, los rayos pasarán por un segundo concentrador con forma parabólica, como se ilustra en la figura 18, para finalmente llegar al receptor, donde un lecho de sales fundidas se calentará para iniciar el proceso de generación de energía eléctrica que se vio en el punto anterior del informe.

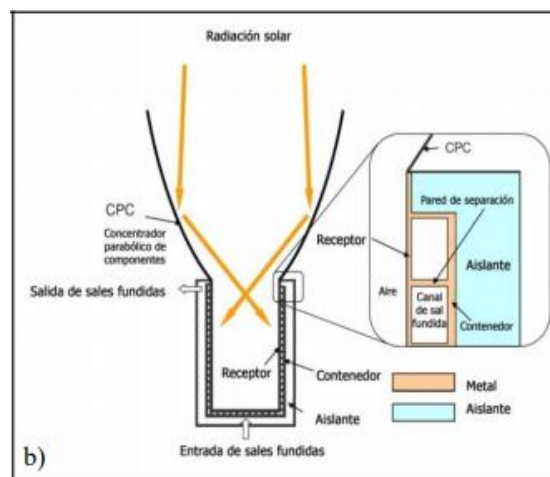


Figura 18: Esquema del receptor central. Fuente: [16]

La energía solar impactará sobre el metal del receptor, existiendo unos canales por los que fluyen las sales fundidas y que permiten elevar su temperatura con mayor facilidad.

### 2.2.5. Resumen de las tecnologías

Una vez se han explicado los modelos más relevantes de plantas de energía solar que existen, en la figura 19 se recogen las principales ventajas y desventajas de estos modelos.

	Colectores Parabólicos	Receptor Central	Disco Parabólico	Línea Fresnel
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mayor desarrollo comercial con más de 16.000 millones de kWh de experiencia operativa; temperatura operativa potencial de hasta 500°C.</li> <li>■ Eficiencia neta anual de probado rendimiento de la planta del 14% (radiación solar a potencia eléctrica neta)</li> <li>■ Modularidad</li> <li>■ Buen uso del terreno</li> <li>■ La menor demanda de materiales</li> <li>■ Concepto híbrido probado</li> <li>■ Capacidad de almacenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Buenas perspectivas para grandes eficiencias de conversión, temperatura operativa potencial de más de 1000°C</li> <li>■ Almacenamiento a altas temperaturas</li> <li>■ Posible operación híbrida</li> <li>■ Mejores para refrigeración en seco que en colectores y Fresnel</li> <li>■ Mejores opciones para usar en lugares no llanos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Eficiencias de conversión muy altas de más del 30%.</li> <li>■ Modularidad</li> <li>■ Integración de una forma más efectiva el almacenamiento térmico en una central térmica</li> <li>■ Experiencia operativa de primeros proyectos de demostración</li> <li>■ Fácil fabricación y producción en serie de las piezas necesarias</li> <li>■ No requiere agua para refrigerar el ciclo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pueden adquirirse espejos planos y doblarse in situ, menos costes de fabricación</li> <li>■ Posible operación híbrida</li> <li>■ Muy alta eficiencia solar alrededor del mediodía solar.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ El uso de medio de transferencia térmica a base de aceite restringe hoy las temperaturas operativas a 400°C, por lo que se obtienen sólo moderadas calidades de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Los valores anuales de rendimiento previstos, los costes de inversión y su operación necesitan pruebas a mayor escala en operaciones comerciales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ No hay ejemplos de uso comercial a gran escala</li> <li>■ Objetivos de costes previstos de producción en serie aún por probar</li> <li>■ Menor potencial de disponibilidad para integración a la red</li> <li>■ Receptores híbridos aún en proceso de I+D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reciente entrada en el mercado, sólo hay pequeños proyectos operativos</li> </ul>

Figura 19: Ventajas y desventajas de los principales modelos de plantas de energía solar. Fuente: [16]



Dentro de las ventajas y desventajas de cada planta, hay que tener en cuenta el coste que supone su implantación, pudiendo ser un factor diferenciador. Centrando la atención en las tres más desarrolladas: cilindro-parabólicas, Disco-Stirling y Central de torre, tienen diferentes costes de implantación, pero el coste de producción de electricidad es muy similar.

Como se puede apreciar en la figura 20, la evolución del coste del Euro/kWh se ha ido igualando con el paso de los años y se estima que para 2020 el precio sea similar para las tres configuraciones, quedando como factor diferenciador el coste de implantación de cada una de las tecnologías.

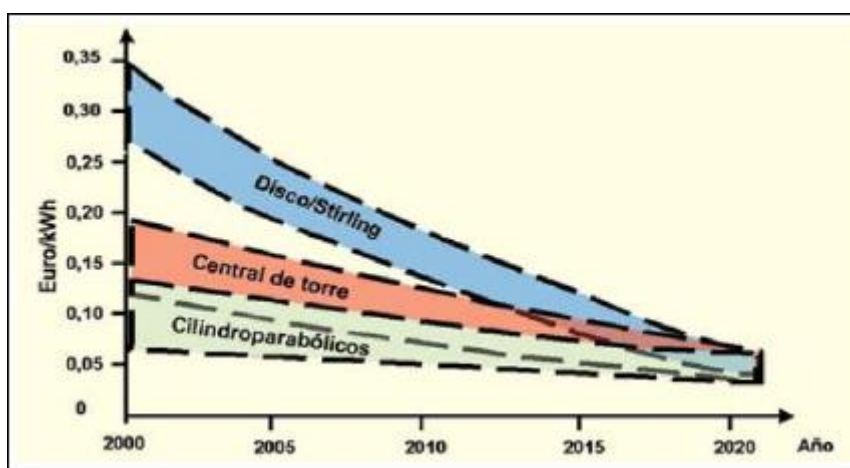


Figura 20: evolución del coste del kWh. Fuente: [16]

## 2.3. Programas utilizados

Antes de finalizar con los fundamentos teóricos y pasar a los cálculos y procedimientos matemáticos, es conveniente hacer una pequeña presentación de los programas utilizados a lo largo del proyecto y que permitirán obtener los resultados y conclusiones.

### 2.3.1 SolTrace

SolTrace es un software gratuito de simulación óptica diseñada para modelar sistemas de concentración de energía solar (CSP). Desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) [26] en 2003 ha sufrido diversas modificaciones y mejoras. Lo que hace importante este programa es la capacidad de modelar en ordenador cualquier sistema óptico que tenga el sol como fuente de energía.

El programa se basa en el rastreo de los rayos seleccionados por el usuario y el estudio del comportamiento de estos al interactuar con los elementos adyacentes. Como usa interacciones de fotones reales, los resultados obtenidos son muy precisos y pudiéndose resolver casos muy complejos. Para una mayor precisión se pueden realizar simulaciones con mayor número de rayos o geometrías más complejas, pero todo esto requerirá más tiempo de cálculo y más potencia del equipo utilizado. Además, los resultados obtenidos

con este programa pueden ser exportados a otros softwares compatibles como por ejemplo Matlab.

Para definir el sol como fuente de luz, se pueden utilizar dos métodos: definir un vector en el espacio desde la posición del sol hasta el centro de coordenadas y la otra, determinar la latitud y la hora del sitio donde se va a situar la planta con lo cual SolTrace calculará la posición y elevación del sol.

Por otro lado, para definir la forma del sol hay tres posibilidades: utilizar una distribución gaussiana, aproximación *pillbox* y finalmente, se puede definir la forma del sol mediante una serie de puntos según la intensidad [27]. Se puede observar en la figura 21.

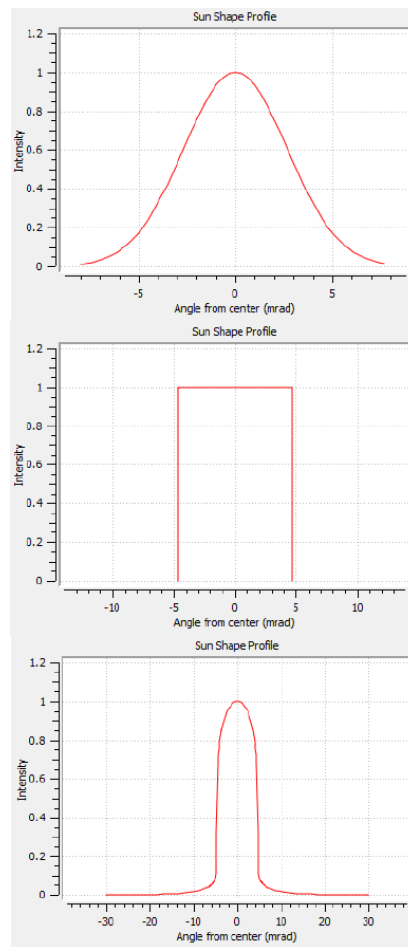


Figura 21: Gaussiana, Pillbox y definida. Fuente: [27].

Para simular la reflexión de los rayos en los espejos, SolTrace utiliza dos errores aleatorios: error de pendiente y especularidad de la superficie. El error de pendiente es una característica macroestructural, mientras el otro error es un efecto de la microestructura. Ambos se pueden ver en la figura 22.

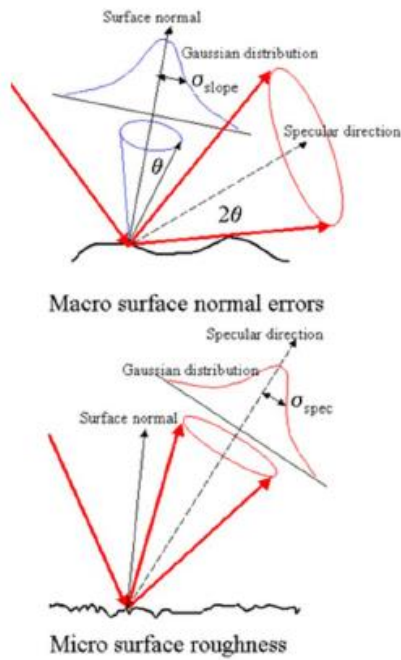


Figura 22: error de pendiente y especularidad de la superficie. Fuente: [27].

De manera que la desviación óptica queda definida por la desviación de los dos errores, como se puede observar en la ecuación 2:

$$\sigma_{optical} = (4\sigma_{slope}^2 + \sigma_{specularity}^2)^{1/2} \quad (2)$$

### 2.3.2 Solid Edge ST10

Solid Edge es uno de los numerosos softwares de diseño asistido por ordenador o CAD. Con él es posible realizar diseños en 3D de casi cualquier pieza que se quiera modelar, pudiendo posteriormente, realizar simulaciones con el diseño al exportarlo a otros programas.

Ofrece la posibilidad de realizar múltiples operaciones como vaciados, doblados de chapa, soldaduras, extrusiones, roscas... aparte de poder utilizar diferentes materiales para cada parte del diseño. Destaca la opción de diseñar con la tecnología síncrona, faceta que no tienen sus competidores, y que permite trabajar y modificar proyectos con total libertad sin que haya operaciones ligadas directamente con otras (excepto algunas excepciones), haciendo que su uso sea más intuitivo, sencillo y rápido.

Es un programa que es propiedad y está desarrollado por la multinacional SIEMENS, aunque la venta del producto no es realizada por esta empresa sino a través de un tercero autorizado.

### **2.3.3     Matlab**

Matlab es un sistema de cálculo numérico que proporciona las herramientas de programación necesarias para que el usuario pueda realizar los desarrollos matemáticos oportunos, empleando un lenguaje de programación propio de este software.

Es uno de los programas de cómputo numérico más utilizados, con el que se pueden realizar entre otras tareas, operaciones con matrices, gráficas de datos y funciones, algoritmos, creación de interfaces de usuario, operaciones matemáticas, además de poder comunicarse con otros softwares y hardware.

Cuenta también con dos expansiones: Simulink que es una plataforma de simulación multidominio y GUIDE que es un editor de interfaces de usuario.

### 3. ESTADO TECNOLÓGICO BEAM-DOWN

#### 3.1. Masdar Beam-Down

Como ya se ha mencionado en la introducción, esta planta solar está dedicada a la investigación y el desarrollo de la energía solar mediante centrales solares Beam-Down. Esta instalación posee de instrumentación para evaluar los recursos solares, la propia planta de 100kW, circuito independiente de aceite caliente y nuevos sistemas de almacenamiento de energía térmica [3].

Para empezar, la plataforma contiene unos sensores meteorológicos a 3 metros del suelo con el que se realizan distintas mediciones (figura 23). Está compuesto de piranómetros y pirheliómetros con los que se miden radiación directa, difusa y global, un fotómetro solar para las propiedades ópticas del aire. También contiene un sensor sónico de viento, sensor de humedad para el rocío... entre otros.



*Figura 23: Plataforma de mediciones. Fuente: [3]*

El campo de heliostatos está formado por 33 espejos de 8,5 m<sup>2</sup> de superficie cada uno. La distribución de los espejos (figura 24) es en tres radios diferentes: A, B y C, en torno a la torre central donde se reflejarán los rayos. Cada heliostato está formado a su vez por 43 espejos individuales como se puede apreciar en la figura 25, que se orientarán de tal manera que se forme una parábola, favoreciendo la concentración de los rayos en el foco superior de la torre.

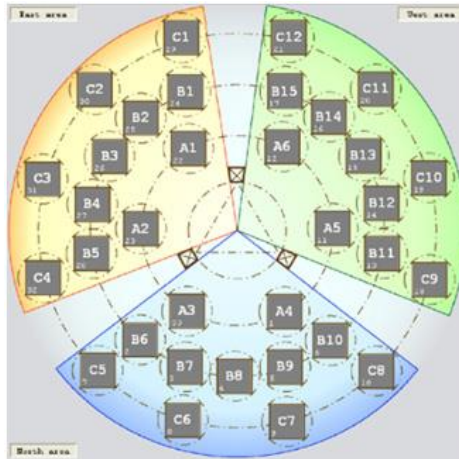


Figura 24: Distribución de los heliostatos. Fuente: [3]

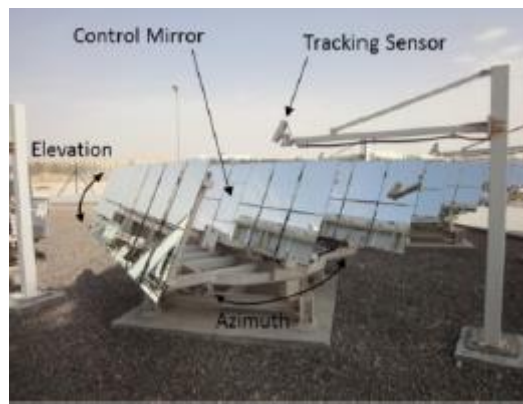


Figura 25: Fotografía de uno de los heliostatos. Fuente: [3]

En cuanto a la torre central, está formada por un reflector central (figura 26) que se encuentra a 16 metros sobre el suelo y que está sujeto por una estructura de 20 metros de altura. Este reflector secundario está compuesto por tres anillos, sumando un total de 45 espejos, quedando cada uno orientado hacia un heliostato en particular. Como solo hay 33 heliostatos, 12 espejos del reflector central se encuentran inutilizados para una posible ampliación de la planta.



Figura 26: Reflector central. Fuente: [3]

El receptor de la central se encuentra situado en el suelo lo cual es una ventaja por su fácil acceso, pero por otro lado compromete la eficiencia de la planta debido a la doble reflexión que se lleva a cabo.

Existen dos receptores diferentes para esta planta que se montarán dependiendo de la configuración deseada o las pruebas a realizar:

- Receptor de aceite: pudiendo elevar la temperatura del fluido de trabajo hasta  $393^{\circ}\text{C}$  es capaz de generar 100 kW. Está compuesto por un receptor solar, una bomba, tanque de expansión, válvulas manuales y automáticas, medidores de flujo, calentador eléctrico y enfriador de aire de 100kW cada uno.

La razón de implementar el calentador eléctrico es para poder llevar a cabo labores de investigación de manera independiente al receptor, simulando diferentes condiciones de trabajo. Con el enfriador se enfría el aceite y se simula la descarga real al producir vapor en un intercambiador de calor.



Figura 27: Receptor de aceite. Fuente: [3]

- Receptor de absorción directa: este receptor permite una mayor temperatura de trabajo que el receptor de aceite, pudiendo superarse los  $400^{\circ}\text{C}$ , usando un tanque de absorción directa de sal fundida.



Figura 28: Receptor de absorción directa. Fuente: [3]

Para aumentar la eficiencia del receptor se instaló un “*Final Optical Element (FOE)*” (figura 29) que consiste en una estructura cónica que disminuye las pérdidas de rayos por la segunda reflexión, mejorando el rendimiento óptico.

Con este elemento se consiguen temperaturas más altas en el fluido de trabajo del receptor.



*Figura 29: FOE. Fuente: [3]*

Una posible aplicación industrial de esta planta sería nuevamente el proyecto de Tatsuya Kodama. Con este sistema de receptores intercambiables sería posible tener tres receptores con los tres combustibles estudiados:  $H_2O$ , carbón y gas natural. De esta manera, sería fácil analizar los tres casos y ver los resultados obtenidos.



## 4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Antes de pasar al proceso de cálculo se ha creído conveniente realizar un pequeño resumen de los pasos que se van a seguir para la obtención de los resultados, de esta manera se procederá de la siguiente manera:

- Diseño y dimensionalización de la planta: para poder comenzar con los cálculos es conveniente dimensionalizar la central en los programas a utilizar, tomando medidas, distribución de los elementos y algunas simplificaciones necesarias.
- Orientación de los espejos: es necesario saber la inclinación y posición de los espejos para conseguir una correcta reflexión de los rayos hacia la parte superior de la torre.
- Dimensionalización del hiperboloide de revolución: fundamental para llevar a cabo un correcto análisis de los resultados, determinando la reflexión de los rayos en él y sus dimensiones.
- Estudio óptico de la central: se propone el estudio de la variación de diferentes parámetros: concentración geométrica, rendimiento óptico y factor de concentración, al producirse desviaciones en la posición del hiperboloide de revolución.
- Estudio térmico de la central: se busca obtener la diferencia de temperaturas que hay en el espejo que forma el hiperboloide de revolución y observar cómo varía la diferencia de temperaturas y la potencia térmica al variar la suposición inicial de la temperatura interna.
- Optimización del reflector secundario: una vez se han realizado todos los cálculos se optimizará el reflector secundario variando las dimensiones del hiperboloide, en concreto la excentricidad, observando como varían los valores de rendimiento.

## 5. CÁLCULOS Y DISEÑO

### 5.1. Introducción

En este apartado del trabajo, se expondrán los procedimientos necesarios para llevar a cabo el cálculo numérico y obtención de los resultados que se mostrarán posteriormente en el informe. Para ello, se hará uso de los siguientes programas informáticos: Matlab, Soltrace y Solid Edge ST10.

### 5.2. Diseño de la planta

#### 5.2.1. Ubicación y análisis climatológico

En primer lugar, conviene recordar que la planta de distribución Beam Down estudiada se encuentra situada en Masdar City, Abu Dabi, con una capacidad de generación de aproximadamente 100 kW [3]. Las coordenadas de la central son:

- Latitud: 24° 25' 0"
- Longitud: 54° 37' 0"

En cuanto a la climatología de Abu Dabi [28], en la figura 30 se puede observar como la temperatura máxima diaria media, durante la mayor parte del año, supera los 30°C.

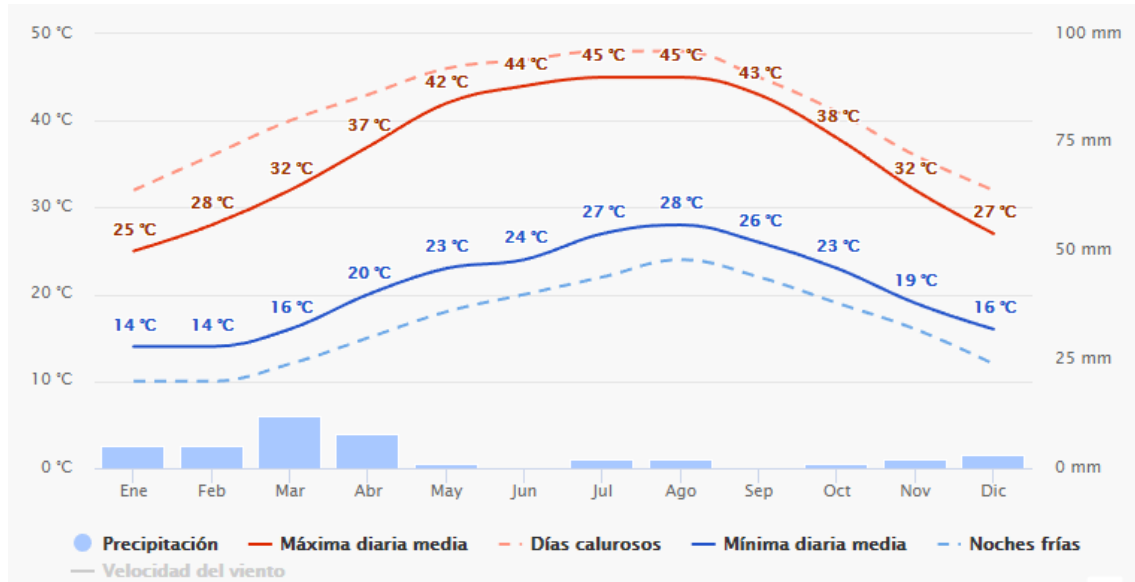


Figura 30: Temperaturas medias mensuales. Fuente: [28]

En la figura 31, la gráfica muestra el número de días de sol, parcialmente nublados y nublados en cada mes, junto con los días que han aparecido precipitaciones, siendo posible hacerse una idea del clima casi desértico del lugar.

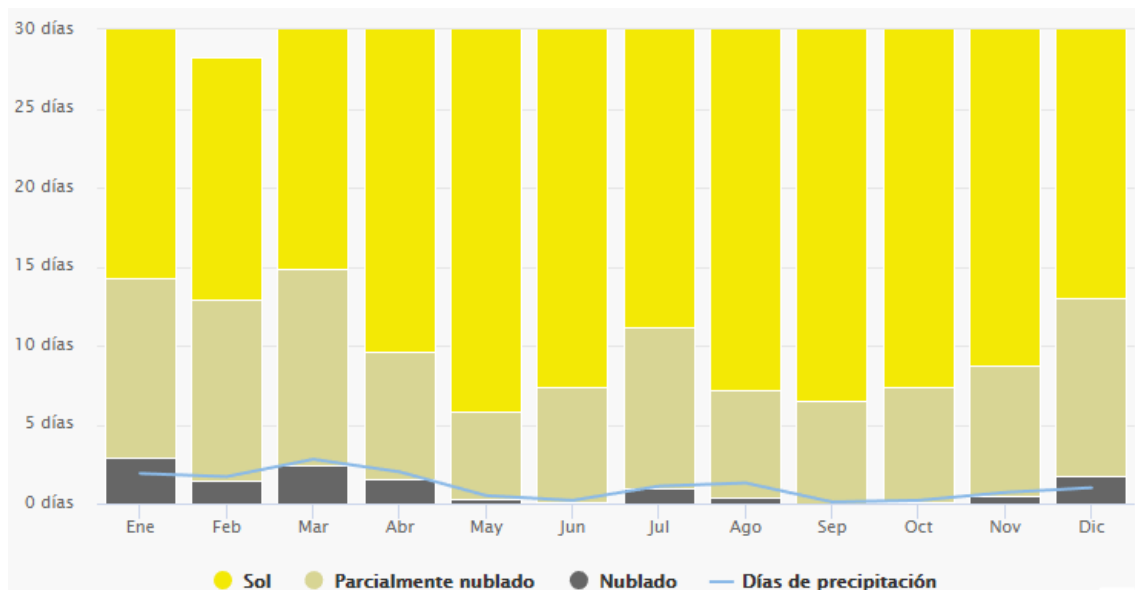


Figura 31: Precipitaciones de Abu Dabi. Fuente: [28]

Para una mejor comparativa de los datos expuestos anteriormente, en la figura 32 y 33, se puede ver con más precisión los valores de temperatura y precipitación anual.

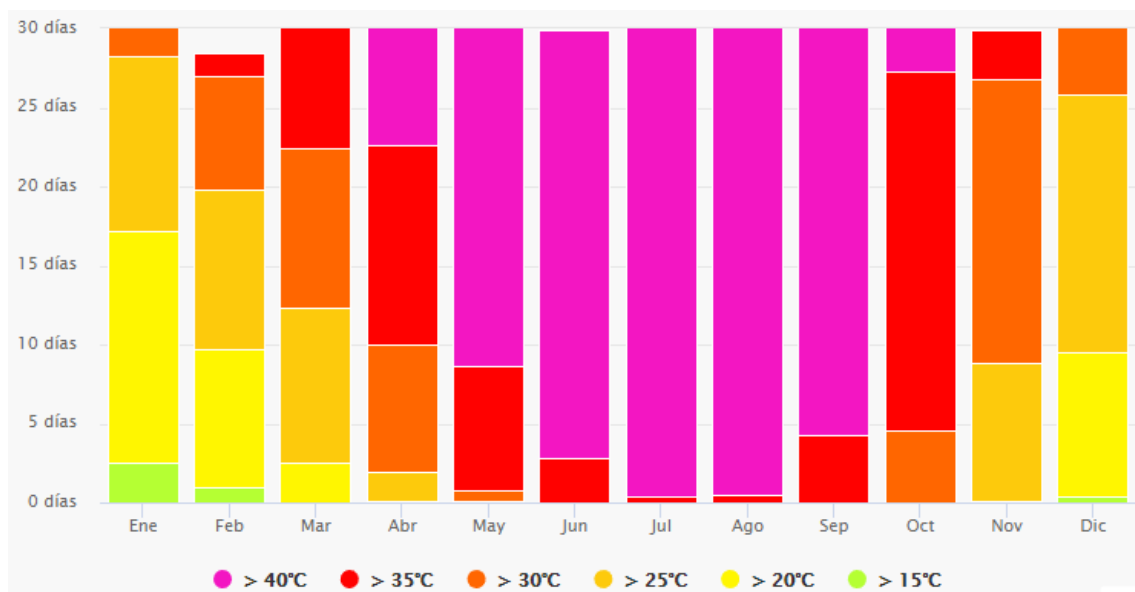


Figura 32: Rango de temperaturas mensuales. Fuente: [28]

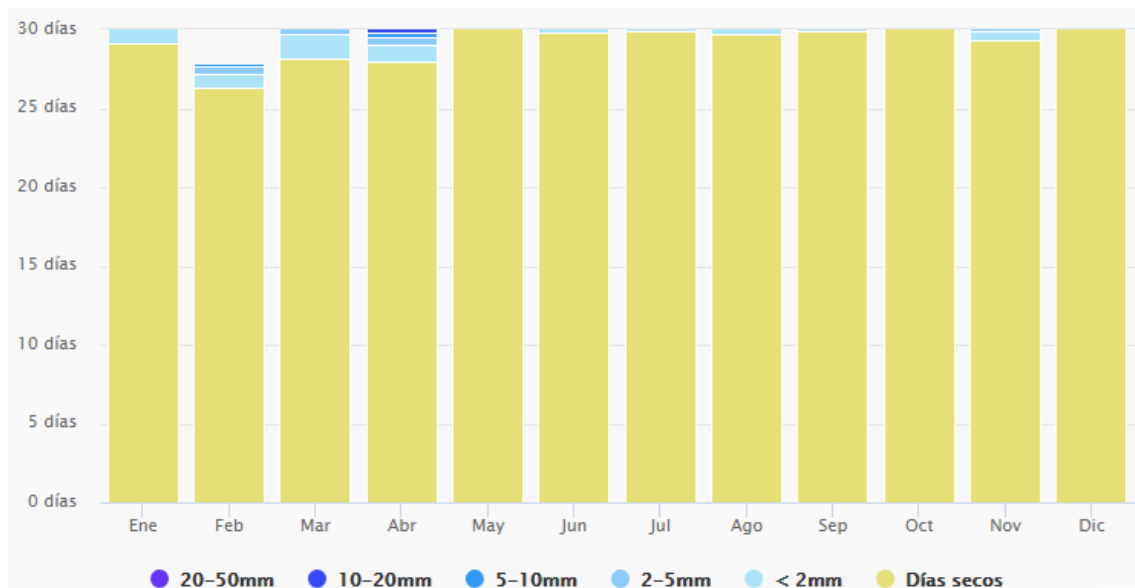


Figura 33: Precipitaciones mensuales. Fuente: [28]

De esta manera, con los datos recogidos anteriormente, se puede llegar a la conclusión de que este emplazamiento es idóneo para la ubicación de una central de energía solar y que su rendimiento y generación de electricidad, obviando los posibles fallos técnicos o paradas para mantenimiento, será constante durante todo el año.

### 5.2.2. Distribución y dimensiones de la planta

Antes de comenzar con los procedimientos de cálculo, es necesario conocer las dimensiones de la central y la distribución de sus espejos.

Al tratarse de una central tipo Beam Down, constará de una torre en el centro que albergará el reflector secundario y el receptor en su base. Por otro lado, los heliostatos se dispondrán como ya se vio en la figura 24. Las coordenadas de los espejos se detallarán en el Anexo del informe.

El diseño de la planta de este trabajo se ha basado en los datos reales [3], recogiendo a continuación las dimensiones de los distintos elementos:

Tabla 1: Dimensione de los heliostatos. Fuente: propia.

Dimensiones de los heliostatos	
Altura (m)	1,5
Ancho (m)	2,5
Largo (m)	3,4
Espesor (m)	0,1

Tabla 2: Dimensiones de la torre. Fuente: propia.

Dimensiones de la torre	
Altura focal (m)	20,3
Altura vértice de los espejos superiores (m)	16
Diámetro del hiperboloide (m)	9,5

Una vez se conocen los datos anteriores, se procede a utilizar un software de diseño llamado Solid Edge ST10, con el que se ha realizado una representación de la instalación introduciendo las siguientes simplificaciones:

- Se tomarán los heliostatos como un único espejo plano.
- El conjunto de espejos de la parte superior de la torre se sustituirá por un hiperboloide de revolución.
- El receptor será representado como prisma de base circular de 6 metros de diámetro.

Cabe destacar que este esquema es únicamente orientativo, los únicos datos obtenidos de él son las normales de los espejos, procedimiento que se explicará posteriormente en el presente informe.

En la figura 34, se muestra una fotografía real de la estructura para poder compararla con la representación realizada en Solid Edge, las cuales se muestran en las figuras 35, 36 y 37

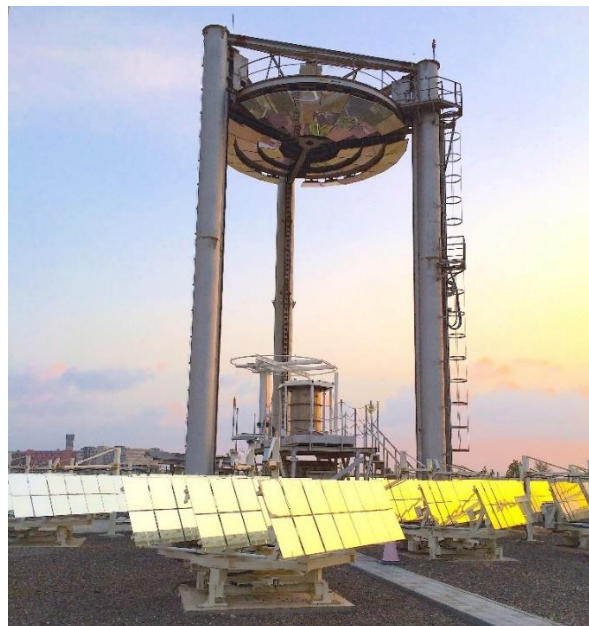
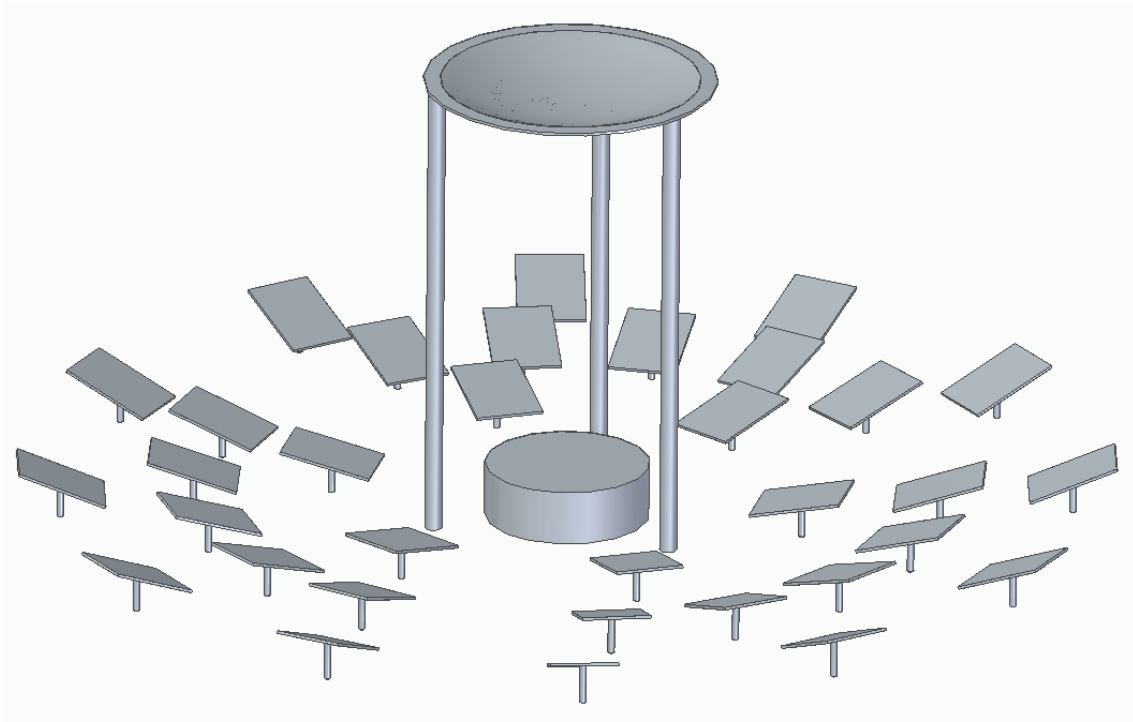
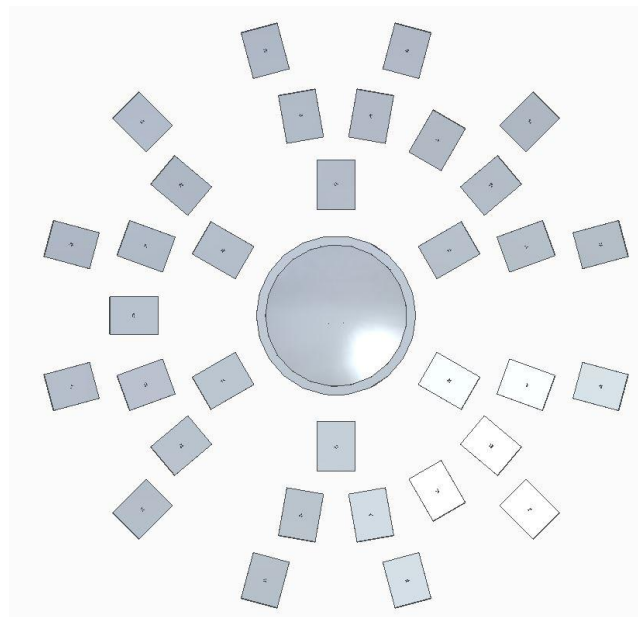


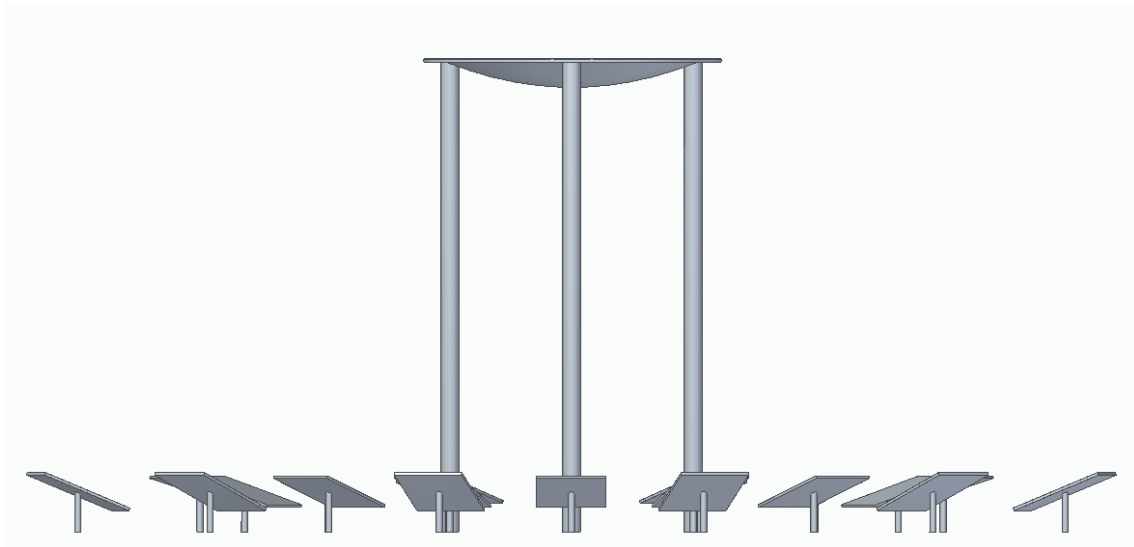
Figura 34: Masdar Beam-Down. Fuente: [3]



*Figura 35: Vista global de la instalación. Fuente: propia.*

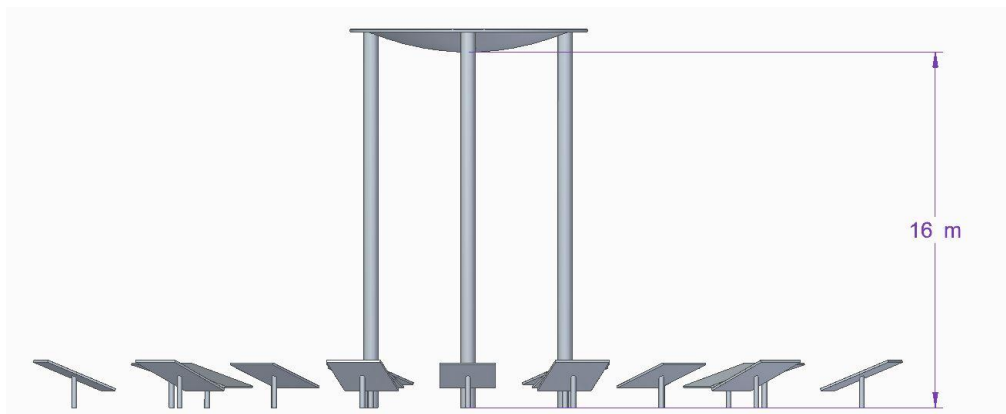


*Figura 36: Vista aérea de la instalación. Fuente: propia.*



*Figura 37: Vista lateral de la instalación. Fuente: propia.*

Para asegurar la correcta dimensionalización de la instalación, en las figuras 38 y 39 se puede comprobar que las medidas introducidas en Solid Edge se corresponden con las reales.



*Figura 38: Altura del vértice de la hipérbola. Fuente: propia*

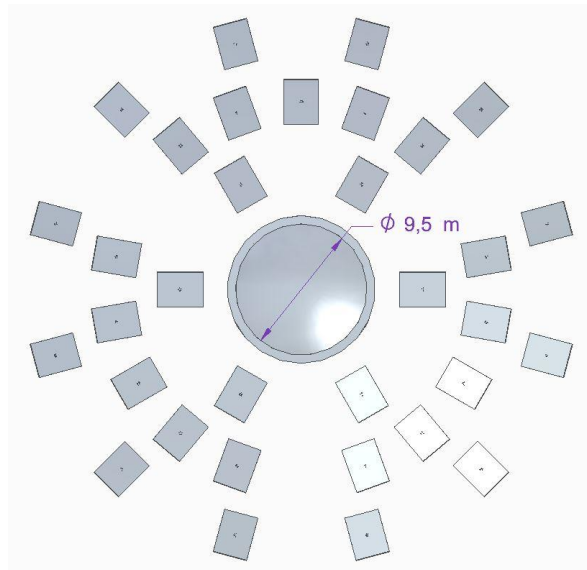


Figura 39: Diámetro del hiperboloide. Fuente: propia.

También se realizó una representación más detallada de los heliostatos para poder observar sus medidas.

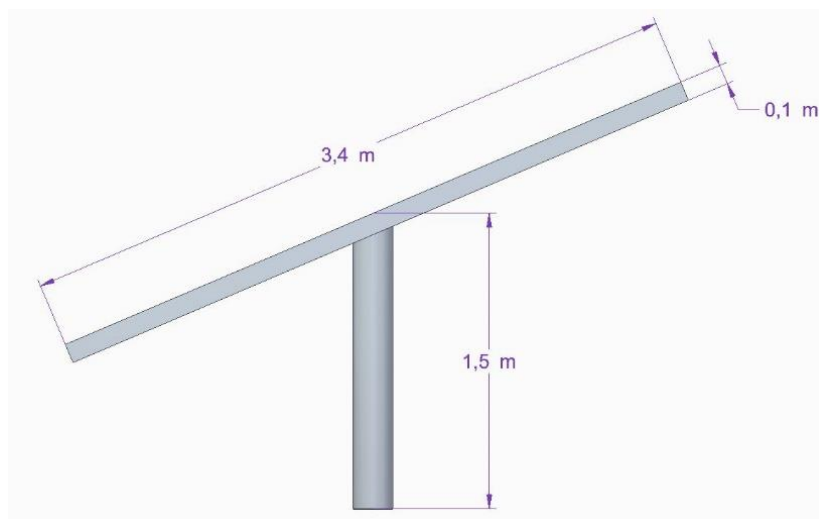


Figura 40: Vista lateral del heliostato. Fuente: propia.

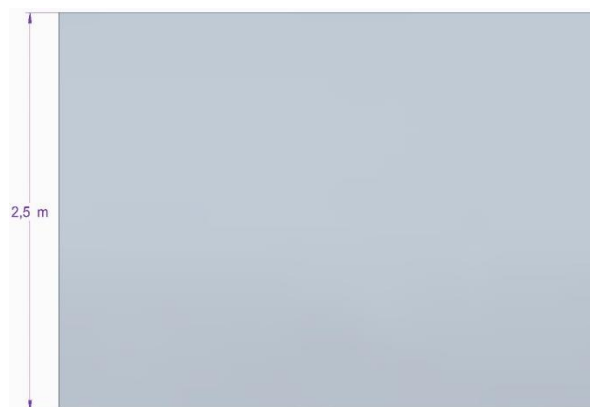


Figura 41: Vista aérea del heliostato. Fuente: propia.



Como se puede intuir en las anteriores imágenes, la distribución de los heliostatos es igual que en la planta real, pero para una correcta visualización se realizaron las siguientes mediciones a modo de comprobación.

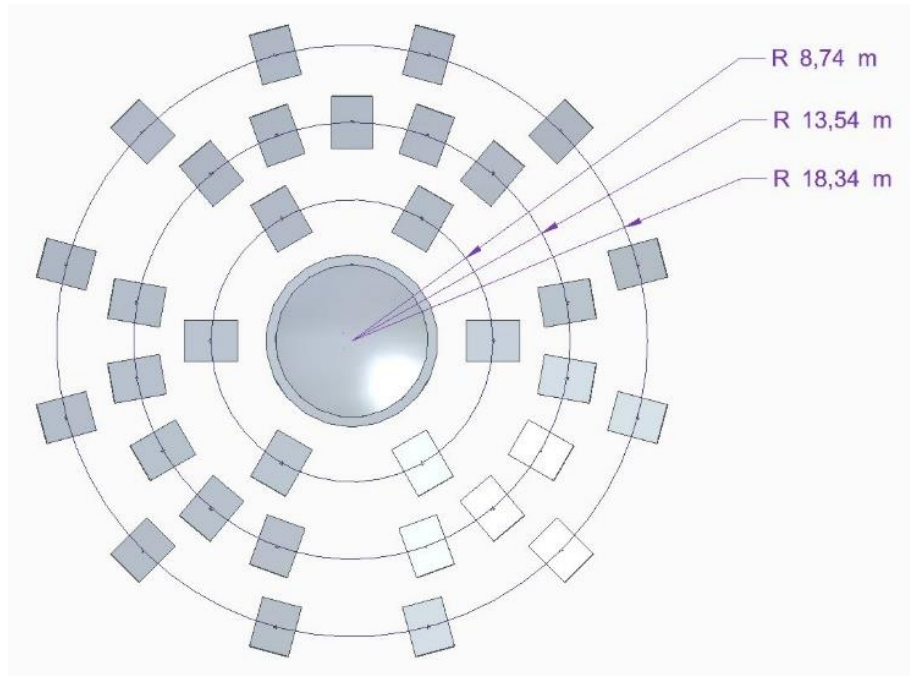


Figura 42: Distancia de los heliostatos con respecto al centro de la planta. Fuente: propia.

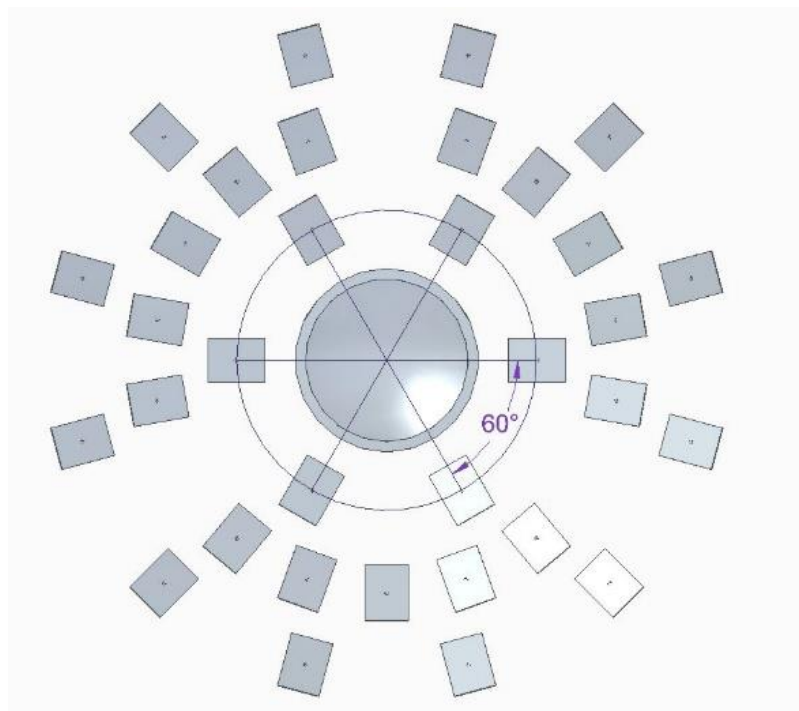


Figura 43: Ángulo de los heliostatos del primer radio. Fuente: propia.

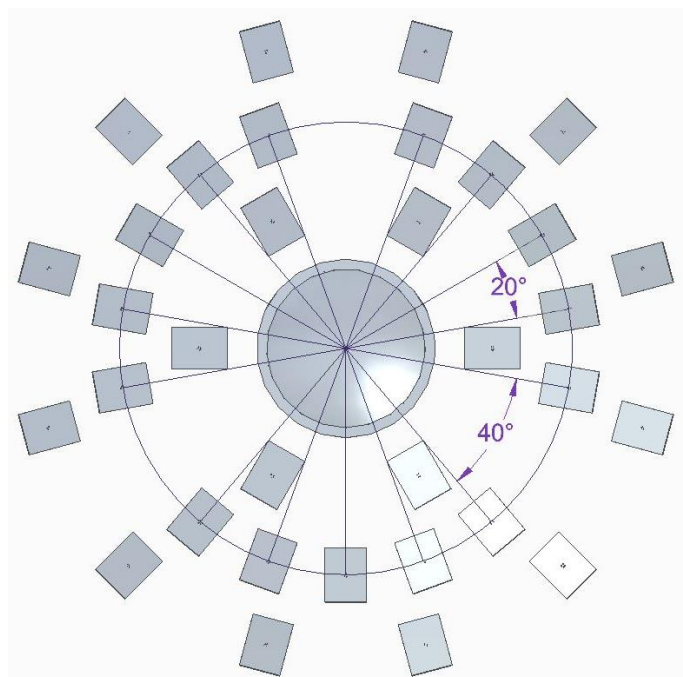


Figura 44: Ángulos de los heliostatos del segundo radio. Fuente: propia.

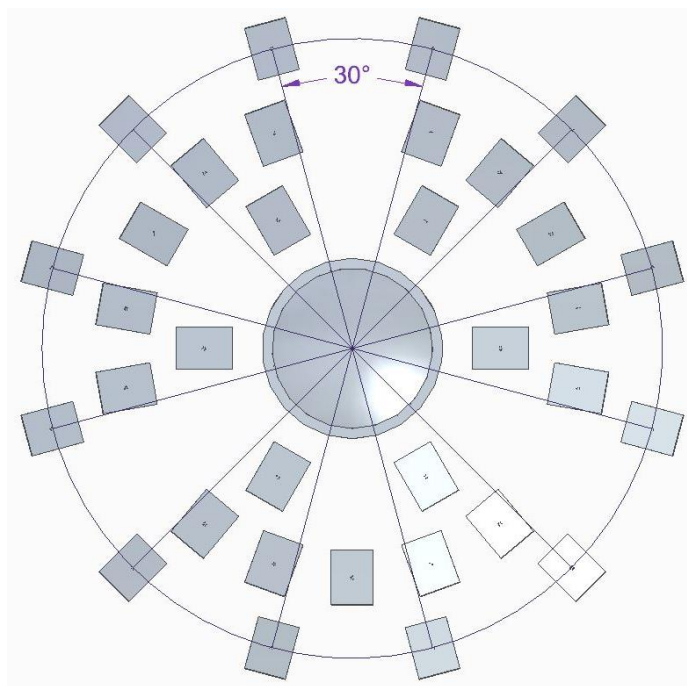


Figura 45: Ángulo de los heliostatos del tercer radio. Fuente: propia.

Conviene destacar antes de pasar al siguiente apartado del informe, que el espacio entre cada espejo debe asegurar que no se den sombra los unos a los otros, ya que este suceso provocaría una disminución del rendimiento de la planta. Este fenómeno se puede ver reflejado en la figura 46.

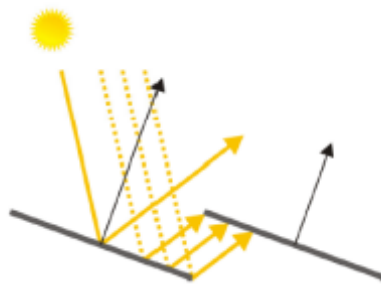


Figura 46: Sombra proyectada por los heliostatos. Fuente: [29]

Una vez se conocen los elementos de la planta, su distribución y dimensiones, es necesario introducir los datos en SolTrace, software que permitirá seguir adelante con el estudio de la planta y la realización del proyecto.

### 5.3. Orientación de los heliostatos

Ahora que se conoce el procedimiento con el cual se ha llegado al diseño de la planta, es momento de pasar a realizar los cálculos. En primer lugar, es necesario orientar los espejos de manera correcta para que el funcionamiento de la instalación sea óptimo.

A modo de introducción, es conveniente comprender como se comportan las reflexiones en los espejos, datos a tener en cuenta y como obtener la inclinación correcta de los heliostatos.

#### 5.3.1 Reflexión de los rayos

Para conocer cómo se comporta un rayo, solo es necesario atender a las leyes de la reflexión. Tal como se observa en la figura 47, el rayo llega al espejo con una trayectoria recta y formando un ángulo con la superficie que se conoce como ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ), al impactar con el espejo, este rayo se refleja con una trayectoria recta y un ángulo de reflexión ( $\theta_r$ ).

Según se recoge en la segunda ley de la reflexión, el ángulo de reflexión será igual al ángulo de incidencia, dato que será fundamental para obtener la inclinación de los espejos.

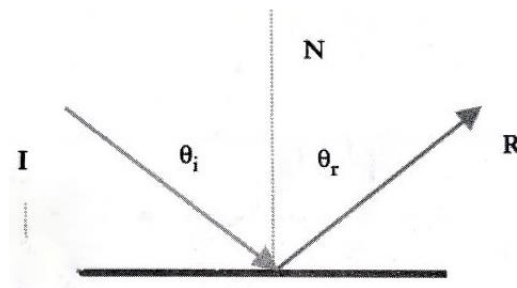


Figura 47: Ángulo de reflexión. Fuente: [29]

Cabe destacar que la superficie de los espejos se considera pulida y, por tanto, la reflexión será especular. En el caso de las superficies rugosas, se conoce como reflexión difusa.

### 5.3.2 Ángulos solares y del heliostato.

Una vez entendida la física de la reflexión de la luz, es necesario conocer los ángulos que permiten la orientación de los heliostatos, los cuales vienen recogidos en la figura 48.

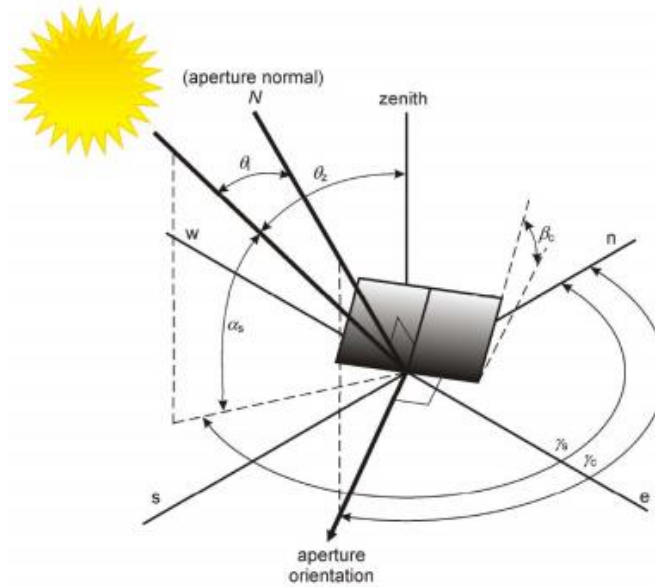


Figura 48: Ángulos del heliostato y el sol. Fuente: [30]

Para empezar, se definirán los ángulos formados por el sol, teniendo en cuenta que la latitud y la longitud de la planta son las presentadas anteriormente en el informe:

- Ángulo acimutal ( $\gamma_s$ ): ángulo entre el Norte y la posición del sol, contenido en el plano horizontal. Definida mediante la ecuación 3:

$$\gamma_s = \arccos \left( \frac{\sin(\delta) \cdot \cos(\phi) - \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\phi)}{\cos(\theta_z)} \right) \quad (3)$$

- Elevación solar ( $\alpha_s$ ): ángulo en el plano vertical entre la línea que une el sol con el eje de coordenadas y el plano horizontal.
- Ángulo cenital ( $\theta_z$ ): ángulo vertical entre el zenith y el sol. Definida mediante la ecuación 4:

$$\theta_z = \arccos(\cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega) + \sin(\delta) \cdot \sin(\phi)) \quad (4)$$

- Ángulo horario ( $\omega$ ): ángulo del sol en los diferentes momentos del día, siendo cero en su posición más elevada, como se puede observar en la figura 47. Definida mediante la ecuación 5:

$$\omega = 15 \cdot (\text{hora} - 12) \quad (5)$$

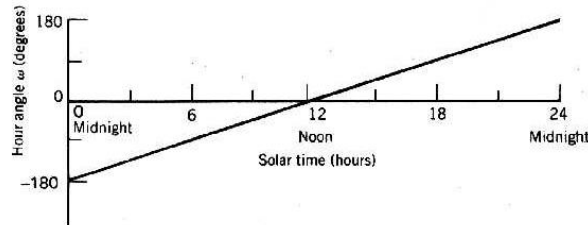


Figura 49: Ángulo horario.

- Declinación ( $\delta$ ): ángulo entre la posición el sol y el plano ecuatorial de la tierra. Definida mediante la ecuación 6:

$$\delta(n) = 23,45 \cdot \text{sen} \left( \frac{360}{365} \cdot (284 + n) \right) \quad (6)$$

Siendo  $n$  el día del año. En la figura 50 se puede observar la variación de este ángulo a lo largo del año.

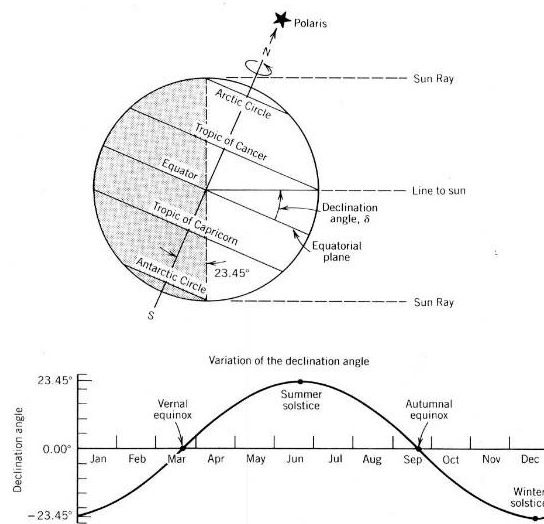


Figura 50: Declinación. Fuente: [31]

Para calcular el ángulo de inclinación de los espejos se hará uso de trigonometría clásica al conocerse la trayectoria del rayo procedente del sol (Rayo 1) y la trayectoria del rayo al foco del hiperboloide (Rayo 2). De esta manera, se podrá obtener el ángulo que forma la normal del espejo ( $\vec{n}$ ) con la trayectoria del rayo, el cual coincidirá con el ángulo de inclinación del heliostato, como se puede observar en la figura 51.

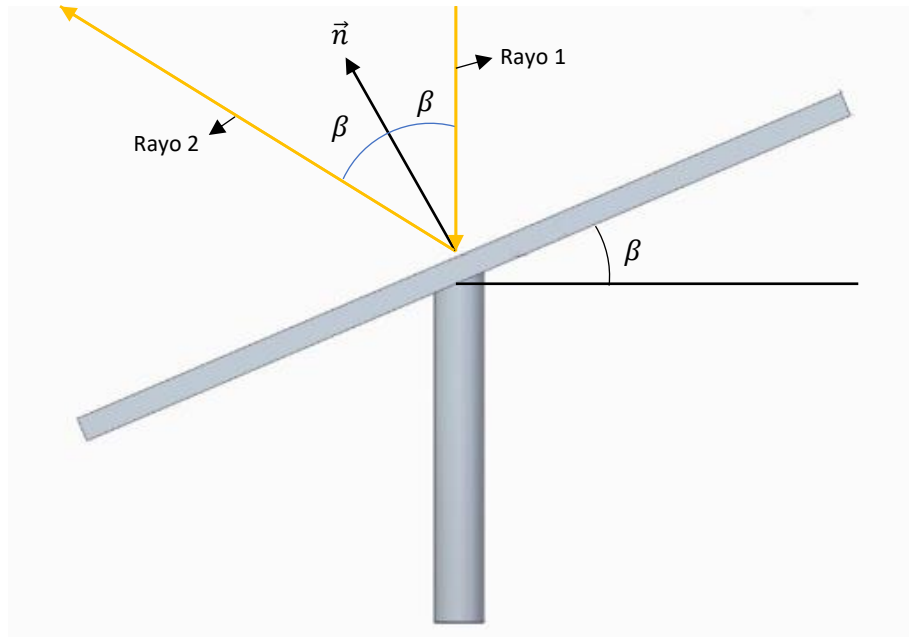


Figura 51: Esquema para la obtención del ángulo del heliostato. Fuente: propia.

Como apunte final, hay que tener en cuenta que en todos los cálculos y procesos llevados a cabo en el proyecto se realizará una simplificación mediante la cual se tomará que el sol está en su punto más elevado, incidiendo los rayos con un ángulo de  $90^\circ$  respecto a la horizontal.

### 5.3.3 Inclinación de los espejos

Para finalizar con los heliostatos, es necesario conocer la inclinación de estos, siendo necesario conocer el valor de la normal, un dato fundamental para poder trabajar con Soltrace y realizar los cálculos pertinentes.

Este procedimiento se puede realizar de manera sencilla con Solid Edge, aprovechando la representación gráfica llevada a cabo con anterioridad.

En primer lugar, será necesario realizar un boceto representando la trayectoria del rayo mediante: un rayo incidente, un rayo reflejado, la altura de la hipérbola y, finalmente,

formando el mismo ángulo con las dos trayectorias del rayo, la normal que se buscaba como se puede apreciar en la figura 52.

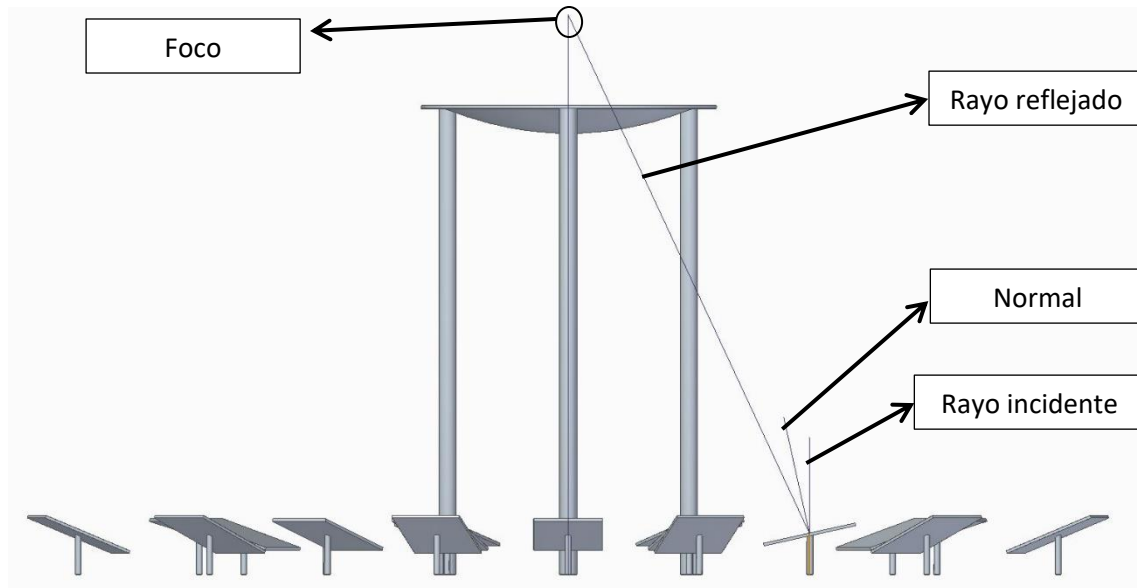


Figura 52: Representación gráfica de la normal. Fuente: propia.

Una vez se tiene gráficamente la normal, será necesario obtener el vector de la normal. Para ello, se establece un valor arbitrario de la componente vertical de la normal y se dibuja, siendo la misma para todos los heliostatos y se completa el vector con las otras dos componentes. Finalmente se miden los vectores con ayuda del comando ‘Smart Dimension’ de Solid Edge.

Es importante recalcar que, debido a la forma de funcionar de SolTrace, el valor de la normal no se puede introducir directamente, será necesario sumársela a las coordenadas del centro del heliostato con su respectivo signo.

Se optó por llevar a cabo este procedimiento para aprovechar el diseño realizado en Solid, siendo un método bastante exacto y porque el número de heliostatos no es muy elevado. Para una planta de mayor tamaño es más sencillo realizar los cálculos en Matlab.

#### 5.4. Hiperboloide de revolución

Como se comentó con anterioridad, se toma la parte superior de la torre como un espejo con forma de hiperboloide de revolución y en este apartado del informe se detallará el proceso seguido.

### 5.4.1 Introducción

Tal y como recogen Hilbert y Cohn-Vossen [32] “un hiperboloide es una superficie cuadrática que puede ser de una o dos hojas. El hiperboloide de dos hojas es una superficie de revolución que se obtiene al girar una hipérbola sobre la línea que une los focos”

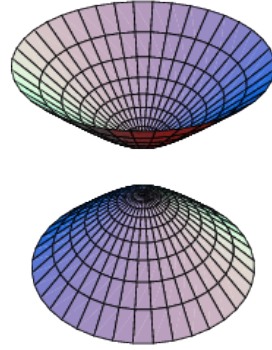


Figura 53: Hiperboloide de revolución.

Por consiguiente, la ecuación del hiperboloide de revolución en coordenadas cartesianas es:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1 \quad (7)$$

### 5.4.2 Cálculo del hiperboloide de revolución

Los datos conocidos en este caso son: la altura a la que se encuentran los dos focos y el valor de la excentricidad. De esta manera el resto de parámetros de la expresión deberán ser hallados. Para ello se han recurrido a las siguientes expresiones [33]:

$$H_{focus} = 2c \quad (8)$$

$$e = \frac{c + a}{H_{focus}} \quad (9)$$

Como el valor de  $H_{focus}$  es la distancia entre los dos focos, despejando se pueden obtener fácilmente los valores de  $c$  y  $a$ . El valor de  $b$  será el mismo que el de  $a$  para que el hiperboloide sea simétrico.

### 5.4.3 Polinomios de Zernike

Una vez se ha calculado el hiperboloide es necesario introducirlo en SolTrace haciendo uso de los polinomios de Zernike. Se tratan de una secuencia infinita de polinomios, ortogonales en el disco unidad [34].



En este caso, los polinomios de Zernike quedan representados mediante la ecuación 10 y son utilizados para ajustar la curva al hiperboloide de revolución ya que SolTrace solo acepta figuras ajustadas.

$$z(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i B_{i,j} \cdot x^j \cdot y^{i-j} \quad (10)$$

El valor de N indicará el grado de desarrollo de la expresión, a mayor grado, mayor precisión en el ajuste de la curva, aunque la complejidad de la ecuación también será más elevada.

### 5.5. Estudio óptico

Una vez se ha llevado a cabo una correcta dimensionalización de la planta Beam-Down mencionada, se puede pasar a realizar el estudio óptico de la instalación. Para ello será necesario el uso de unas expresiones que se detallarán en este apartado y que permitirán obtener una serie de resultados con las que se sacarán las debidas conclusiones.

Antes de comenzar a presentar las ecuaciones, es conveniente explicar el porqué de este estudio. Debido a la situación geográfica de la planta, en una zona desprovista de vegetación, ni población cercana que puedan mitigar los efectos del viento, se quiere observar cómo afectaría al rendimiento y al factor de concentración, desviaciones del reflector secundario por el efecto de este factor meteorológico, al igual que posibles errores de montaje. Se estudiarán diferentes casos: sin desviación y desviación de 1mm, 1cm, 10cm, 50cm y 1m.

En primer lugar, se define la concentración geométrica (ecuación 11) como la relación entre el área total de los reflectores primarios, es decir de los 33 heliostatos, y el área del receptor.

$$C_g = \frac{\text{Área heliostatos}}{\text{Área del receptor}} \quad (11)$$

El rendimiento óptico de la instalación se calculará, como aparece en la ecuación 12, mediante la relación entre la potencia que llega al receptor procedente de los rayos reflejados y la potencia procedente del sol.

$$\eta_{\text{óptico instalación}} = \frac{\dot{Q}_{\text{receptor}}}{\dot{Q}_{\text{sol}}} \quad (12)$$

La  $\dot{Q}_{\text{receptor}}$  se obtendrá mediante SolTrace, el cual ofrece el valor de la potencia en un diferencial de área determinado, teniendo que integrar sobre la superficie del receptor para conseguir una solución más precisa.

Por otro lado, la  $\dot{Q}_{sol}$  se calculará mediante la ecuación 13, donde DNI será 1000 W/m<sup>2</sup> y el área del heliostato 8,5 m<sup>2</sup>.

$$\dot{Q}_{sol} = DNI \cdot \text{número de heliostatos} \cdot \text{Área}_{\text{heliostato}} \quad (13)$$

Para entender mejor a qué hace referencia cada una de las potencias de las expresiones anteriores es necesario observar la figura 54.

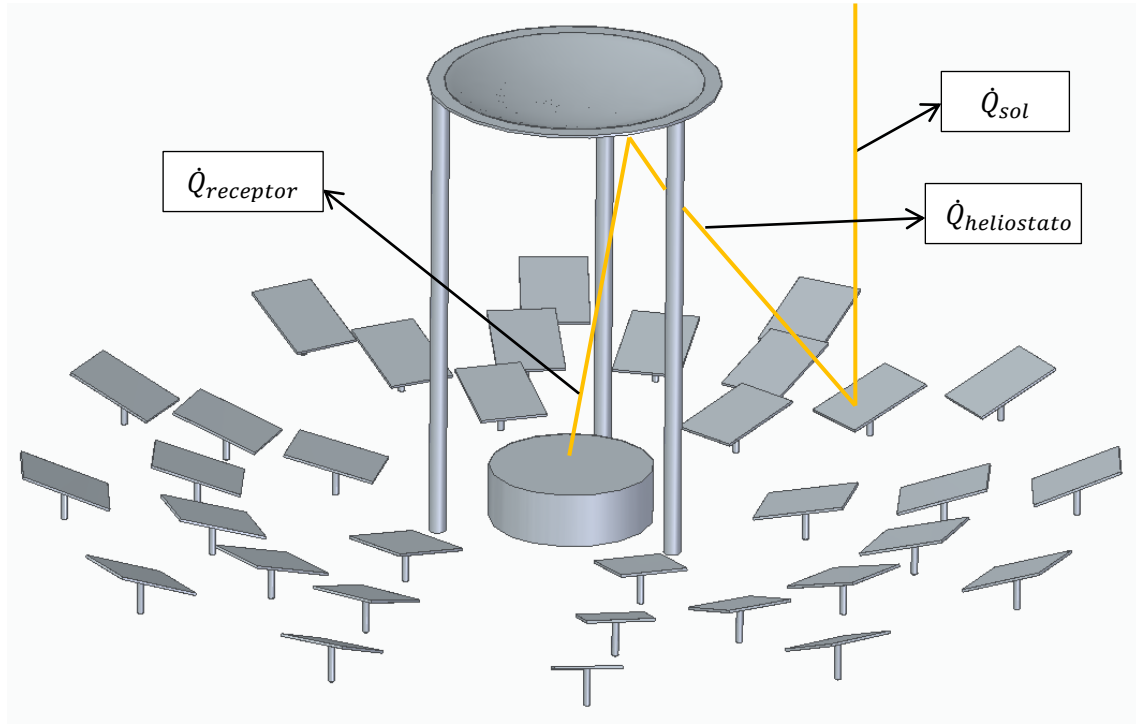


Figura 54: Esquema de potencias de la central. Fuente: propia.

Finalmente, para acabar con el estudio óptico será necesario conocer el valor del factor de concentración que queda definido mediante la ecuación 14.

$$C = \eta_{\text{óptico instalación}} \cdot C_g \quad (14)$$

## 5.6. Estudio térmico

Para este último apartado del trabajo, se realizará una explicación de la metodología seguida para llevar a cabo el estudio térmico.

Lo que se pretende con este análisis es conocer la temperatura a la que se encuentra el espejo que conforma el hiperboloide de revolución de la zona superior de la estructura Beam-Down mientras se encuentra en funcionamiento y, una vez se conozca, proponer un modelo de refrigeración para evitar posibles averías o problemas de funcionamiento por exceso de temperatura.

Es necesario fijarse en la figura 55 para comprender como se va a calcular la temperatura. En ella se muestra la sección transversal del hiperboloide de revolución y el esquema de las resistencias térmicas que definen el comportamiento térmico de esta parte de la estructura.

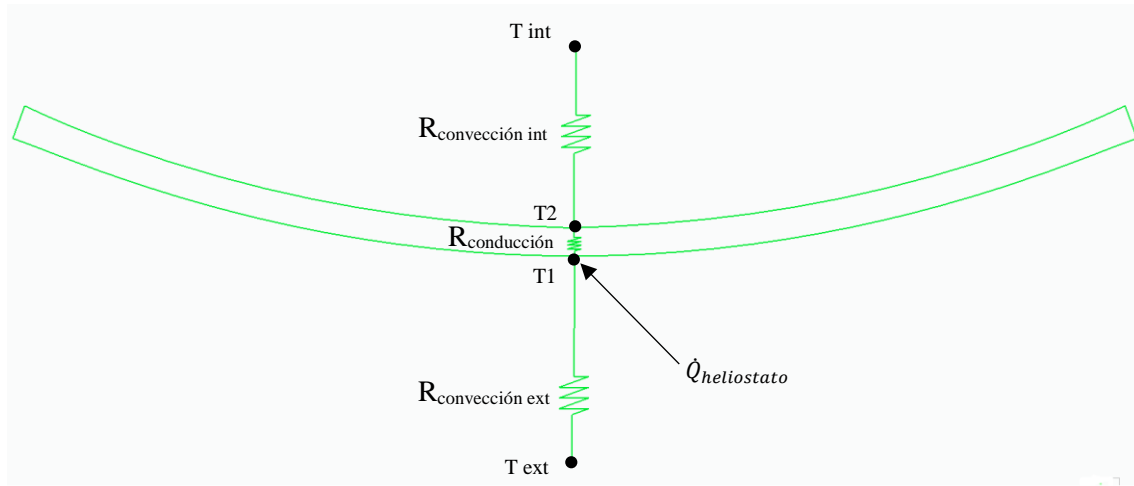


Figura 55: Esquema de resistencias térmicas del hiperboloide de revolución. Fuente: propia.

Antes de definir las ecuaciones que permitirán hallar las temperaturas deseadas es conveniente presentar los datos conocidos y, de esta manera, poder saber cuáles son las incógnitas y de qué manera se va a plantear la solución matemática:

- Son conocidas la temperatura exterior, que será 45°C (media máxima anual) y 25°C (media mínima anual) y la temperatura interior que se ha supuesto como 5°C superior a la temperatura exterior como primera aproximación.
- El espesor del espejo será de 30cm y la superficie se simplificará como el área de una esfera de diámetro igual al valor de la apertura del hiperboloide.
- El coeficiente convectivo del aire exterior será de  $h_{\text{exterior}} = 10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  y el del aire interior del hiperboloide de  $h_{\text{interior}} = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .
- El coeficiente de conducción del vidrio, material del cual están hechos los espejos, se ha tomado como  $k_{\text{aluminio}} = 1 \text{ W/mK}$ .

Una vez conocidas las condiciones ambientales y propiedades anteriores, es momento de presentar las ecuaciones necesarias para resolver la cuestión tratada en este apartado del proyecto. Para ello, será necesario apoyarse en las ecuaciones de transferencia de calor relacionadas con la convección (ecuación 15) y la conducción (ecuación 16).

$$q_{\text{conducción}} = \frac{k \cdot A}{\text{espesor}} \cdot (T_h - T_c) \quad (15)$$

Donde:

- $q_{conducción}$ : Potencia térmica de conducción [W].
- $k$ : Coeficiente de conducción [W/mK].
- $A$ : Área de contacto, es decir, el área del hiperboloide de revolución [m<sup>2</sup>].
- $espesor$ : espesor de la superficie donde se produce la conducción [m].
- $T_h$ : Temperatura de la superficie caliente [K].
- $T_c$ : Temperatura de la superficie fría [K].

$$q_{convección} = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (16)$$

Donde:

- $q_{convección}$ : Potencia térmica de convección [W].
- $h$ : Coeficiente convectivo [W/m<sup>2</sup> K].
- $A$ : Área de contacto, es decir, el área del hiperboloide de revolución [m<sup>2</sup>].
- $T_s$ : Temperatura de la superficie [K].
- $T_{\infty}$ : Temperatura ambiente [K].

Fijando la atención de nuevo en la figura 55 se procederá a explicar la forma de obtener el sistema de ecuaciones que permita hallar los valores de temperatura para las dos caras del hiperboloide de revolución, a una temperatura ambiente de 45°C y 25°C.

En primer lugar, realizando equilibrio térmico entre T1 y Tint, usando la expresión de conducción para el tramo T1-T2 y convección para T1-Tint, se llega a la ecuación 17 la cual será la primera ecuación de nuestro sistema.

$$\frac{k_{vidrio} \cdot A_{hiperboloide}}{espesor \text{ del espejo}} \cdot (T_1 - T_2) = h_{interior} \cdot A_{hiperboloide} \cdot (T_2 - T_{int}) \quad (17)$$

De igual manera, realizando equilibrio entre T2 y Text se llegará a la ecuación 18 que completará el sistema, con una puntualización, y es que en esta región del espacio es necesario tener en cuenta, además de la convección, la potencia térmica procedente de los rayos reflejados sobre los heliostatos como se puede observar en la figura 56, con la diferencia de que en el caso estudiado se despreciará el circuito de radiación.

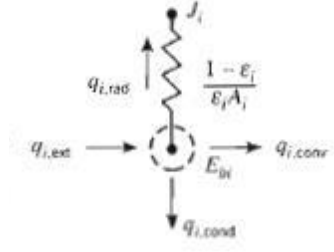


Figura 56: Balance de energía. Fuente: [35]

$$\dot{Q}_{helioestado} = \frac{k_{vidrio} \cdot A_{hiper}}{espesor\ del\ espejo} \cdot (T_1 - T_2) + h_{ext} \cdot A_{hiper} \cdot (T_1 - T_{ext}) \quad (18)$$

Únicamente falta averiguar el valor de la potencia procedente de los heliostatos (ecuación 19).

$$\dot{Q}_{helioestado} = DNI \cdot \eta_{\text{óptico heliostatos}} \cdot \text{Área}_{helioestado} \quad (19)$$

Para averiguar el rendimiento óptico de los heliostatos será necesario emplear la ecuación 19, como el valor de la potencia que llega al receptor se obtuvo integrando los datos proporcionados por SolTrace y la potencia la  $\dot{Q}_{sol}$  queda definida mediante la ecuación 13, se conocen todos los datos para hallarlo.

$$\eta_{\text{óptico heliostatos}} = \frac{\dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{receptor}}{\dot{Q}_{sol}} \quad (20)$$

Finalmente, con la ecuación 19 y 20 se puede obtener la diferencia de temperatura del hiperboloide de revolución y ver como varía este valor para otras condiciones de temperatura interior, además de la potencia térmica necesaria para alcanzarlos.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Introducción

En este cuarto apartado del informe se expondrán los resultados obtenidos, tanto para el diseño de la central, como para realizar el estudio óptico y térmico mencionados en anteriores apartados de este documento. La estructura seguida será:

- Ángulos solares e inclinación de los heliostatos.
- Posición de los espejos.
- Parámetros del hiperboloide de revolución.
- Resultados del estudio óptico.
- Resultados del estudio térmico.

### 6.2. Ángulos solares e inclinación de los heliostatos

Para estos cálculos se ha elegido el solsticio de verano, 21 de junio, debido a que es el día con más horas de sol del año, situándose el sol en su punto más elevado a las 13:23h del medio día [36].

No es algo significativo ya que solo se utilizará para dar unos valores de ángulos que permitan hacerse una idea de la posición del sol y los heliostatos, pudiendo haberse tomado cualquier otro día y hora para la realización de los cálculos.

En la tabla 3 se presentan los resultados de los ángulos del sol, obtenidos empleándose las ecuaciones recogidas en el apartado 5.3.2 del informe.

Tabla 3: Ángulos formados por el sol. Fuente: propia.

<u>Parámetro</u>	<u>Grados [°]</u>
Ángulo horario ( $\omega$ )	18,45
Declinación ( $\delta$ )	23,43
Ángulo cenital ( $\theta_z$ )	16,88
Ángulo acimutal ( $\gamma_s$ )	89,54

Para conocer la inclinación de los heliostatos, tal como se mencionaba en el apartado 5.3.2 únicamente será necesario aplicar trigonometría básica. Los datos necesarios son la altura del foco superior, altura de los heliostatos y la distancia a la que se encuentran los

tres perímetros de heliostatos. De esta manera se obtienen los ángulos que aparecen recogidos en la tabla 4.

- Altura del foco superior = 20,3 metros.
- Radio A = 8,74 metros.
- Radio B = 13,54 metros.
- Radio C = 18,34 metros.

Tabla 4: Inclinação de los heliostatos. Fuente: propia.

<u>Inclinación</u>	<u>Grados [°]</u>
Heliostatos del radio A	12,47
Heliostatos del radio B	17,88
Heliostatos del radio B	22,14

### 6.3. Ajuste del hiperboloide de revolución

Como primera aproximación se utilizarán los parámetros recogidos en la tabla 5 para representar el hiperboloide, aunque como se verá posteriormente, estos datos variarán al modificar el valor de la excentricidad con el objetivo de observar la variación del rendimiento con las distintas geometrías del reflector secundario.

Tabla 5: Datos para la dimensionalización del hiperboloide de revolución. Fuente: propia.

Distancia entre focos	18,3 [m]
Excentricidad	1
a	9,15 [m]
b	9,15 [m]
c	9,15 [m]

Con los datos de la tabla anterior y las expresiones explicadas en el apartado 5.4, se utilizarán las herramientas de Matlab para realizar la representación de la figura 57.

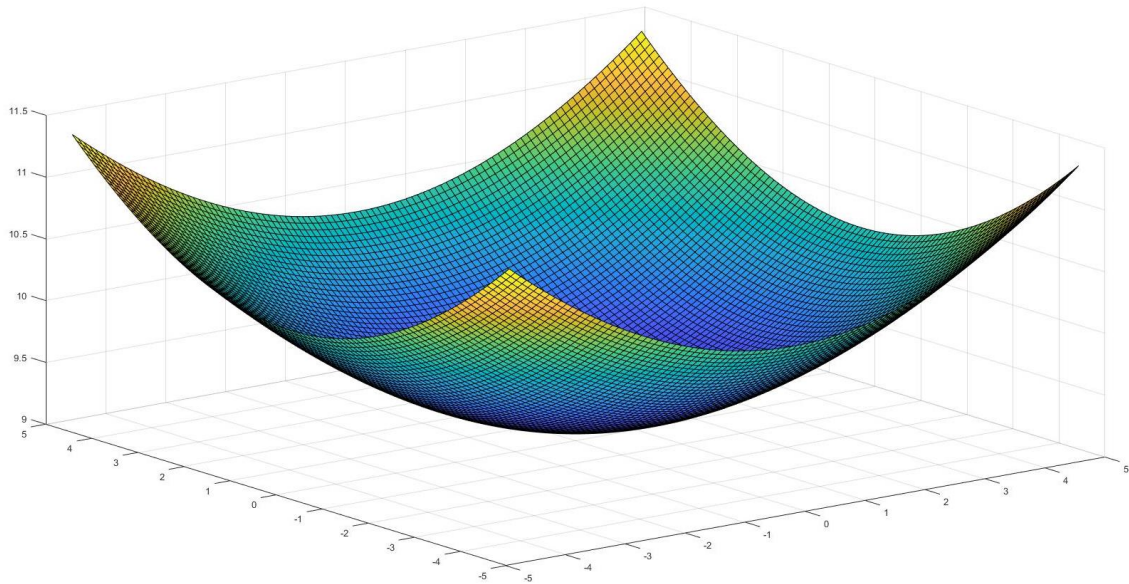


Figura 57: Representación hiperboloide de revolución. Fuente: propia.

Pero como se explicó con anterioridad, para poder conseguir los datos necesarios para llevar a cabo el resto de apartados del trabajo, es necesario usar el polinomio de Zernike para obtener unos coeficientes que serán introducidos en SolTrace, lográndose el ajuste de la figura 58.

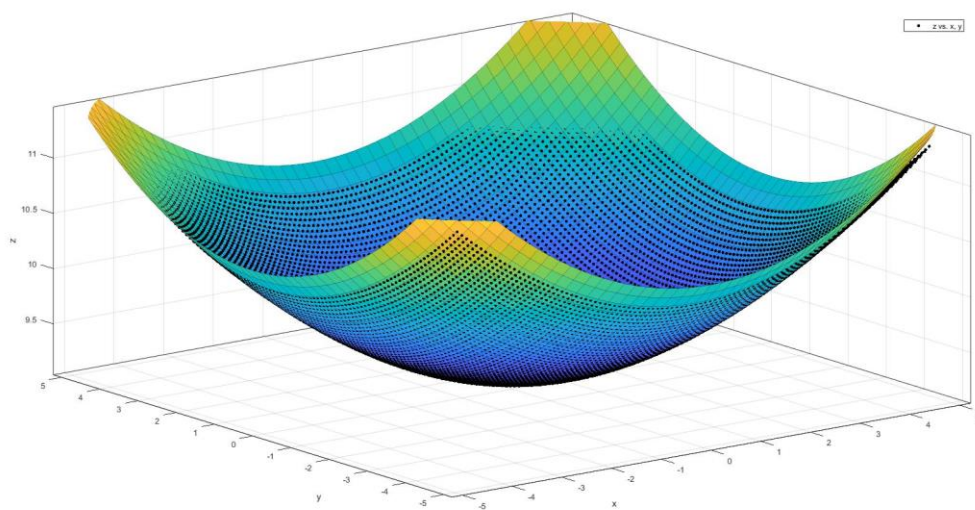


Figura 58: Ajuste del hiperboloide de revolución. Fuente: propia.



#### 6.4. Dimensionalización final en SolTrace

Para finalizar con la exposición de resultados de la dimensionalización de la central, en la figura 59 se muestra la representación de la planta en SolTrace y en el resto una simulación de la reflexión de los rayos solares variando el número de estos.

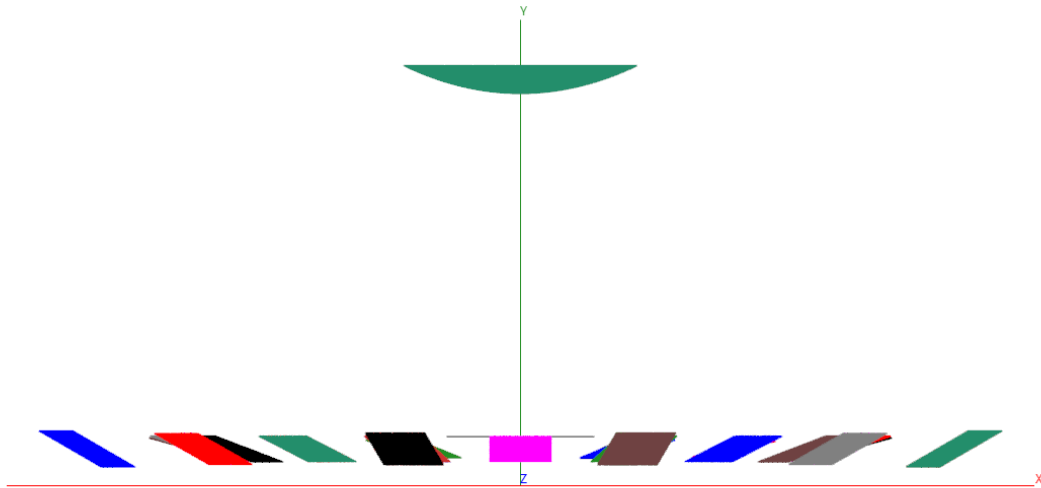


Figura 59: Representación de la central en SolTrace. Fuente: propia.

- Simulación con 20 rayos:

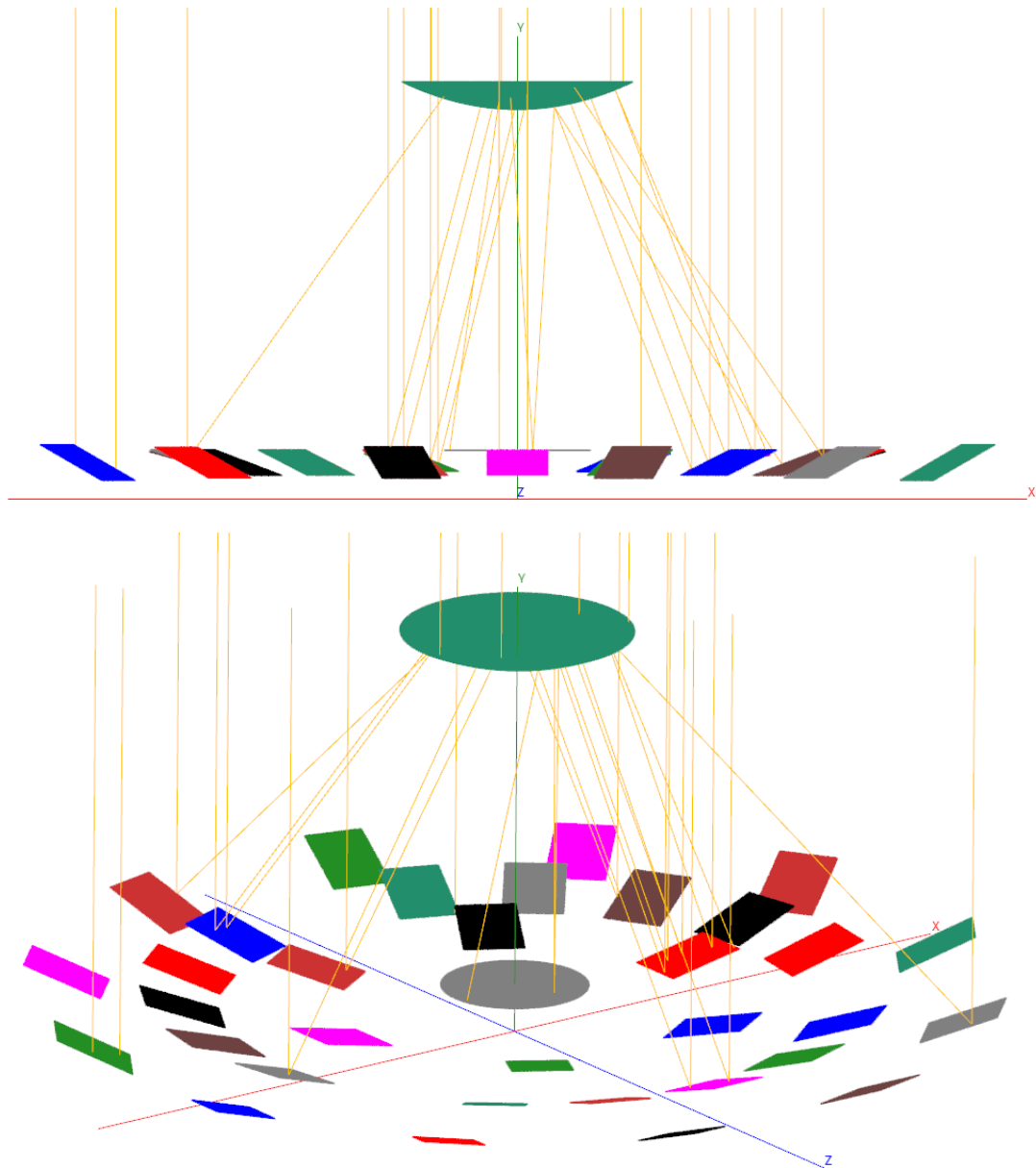


Figura 60: Simulación del impacto de 20 rayos. Fuente: propia.

- Simulación con 50 rayos:

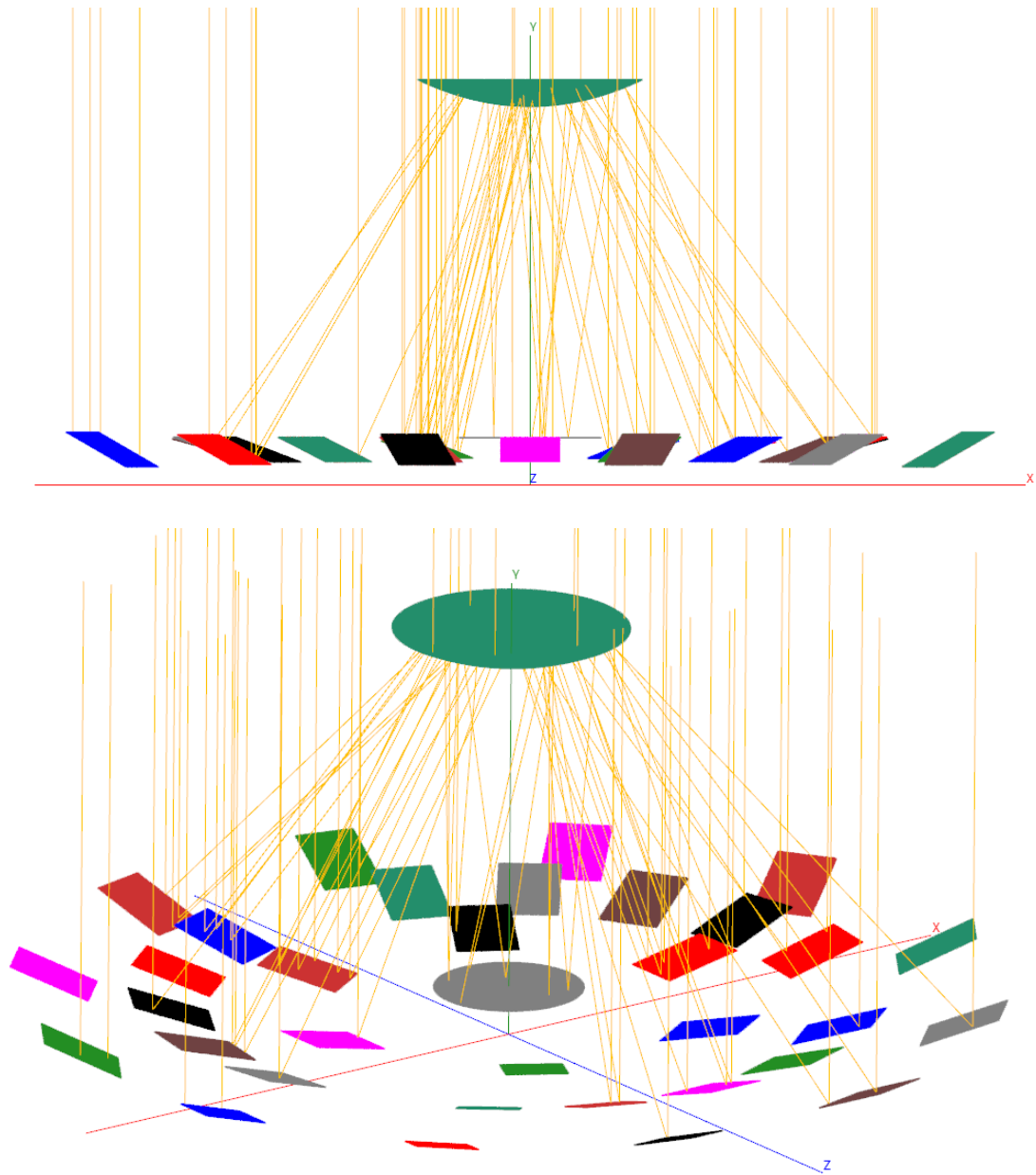


Figura 61: Simulación del impacto de 50 rayos. Fuente: propia.

- Simulación con 100 rayos:

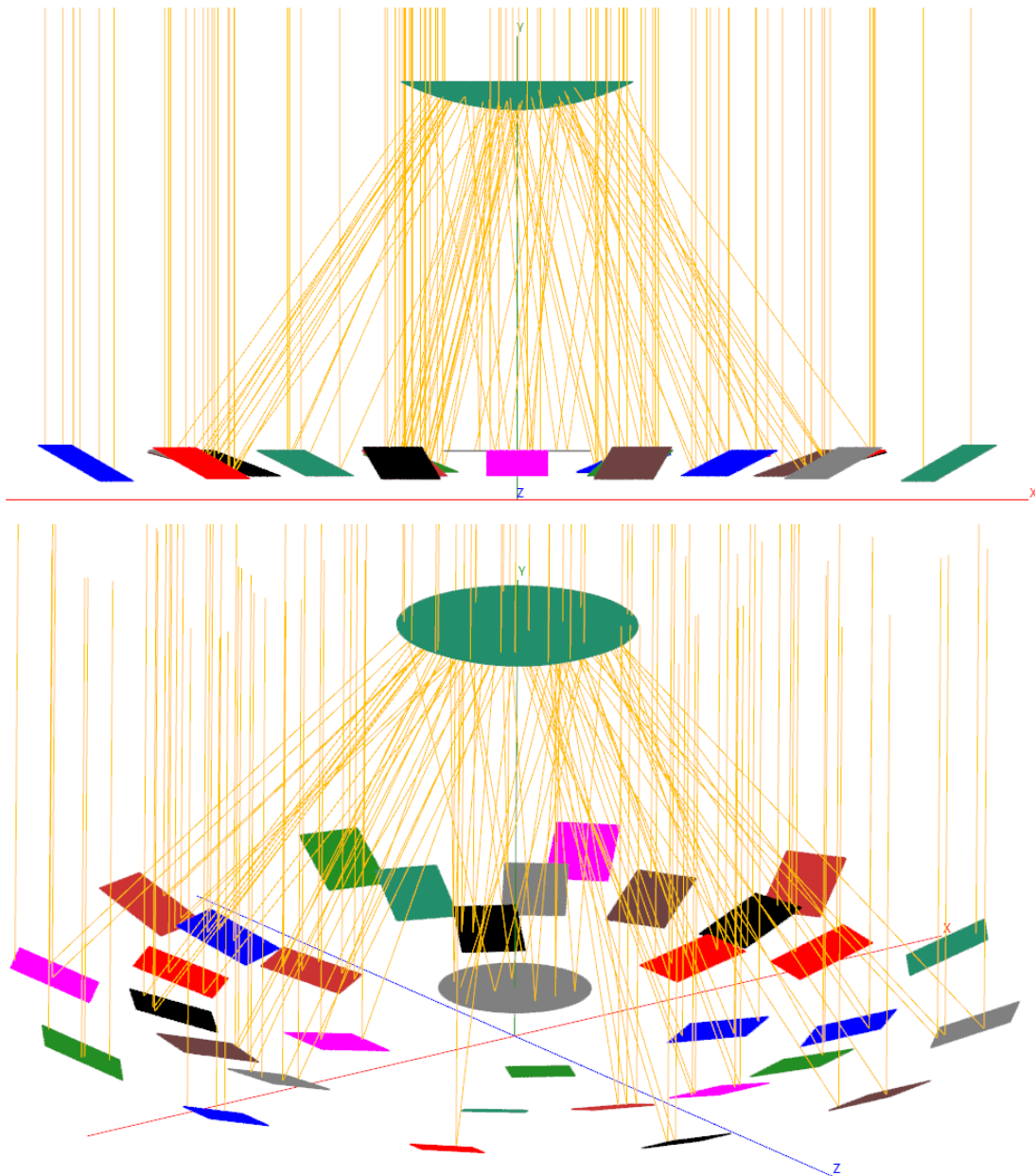


Figura 62: Simulación del impacto de 100 rayos. Fuente: propia.

- Simulación con 500 rayos:

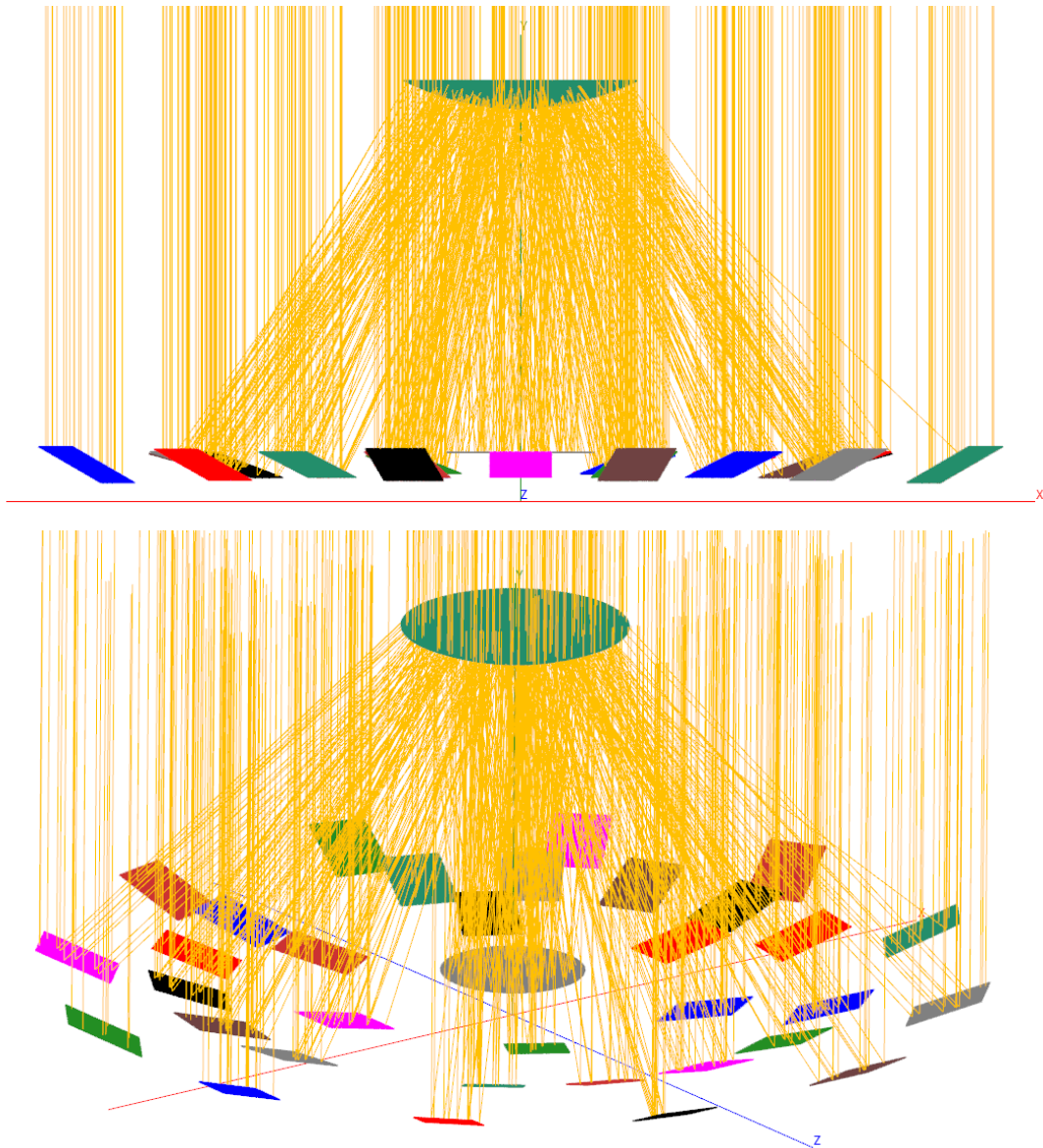


Figura 63: Simulación del impacto de 500 rayos. Fuente: propia.

Observando con detenimiento las ilustraciones anteriores, se puede detectar que no todos los rayos llegan a su destino, muchos impactan sobre la parte superior del hiperboloide, otros no impactan en los espejos (aunque estos no han sido representados) o al rebotar en los heliostatos no llegan al reflector secundario. Por tanto, con esta representación se puede ver de manera visual el funcionamiento de la planta.

Además, si se varía el valor de la excentricidad del hiperboloide esto hará que la forma del reflector secundario varíe y de esta manera lo hará el rendimiento de la planta, aspecto que se tratará numéricamente en el siguiente apartado.

## 6.5. Estudio óptico

En este apartado del informe se hará uso de las expresiones presentadas en el punto 3.5, para ello es necesario obtener una serie de resultados de SolTrace. Con la simulación realizada, se consigue el mapa de flujo presentado en la figura 64, el cual refleja los valores de potencia en la superficie del receptor. De igual manera, en la figura 65 se muestra el mapa de uno de los heliostatos a modo de ejemplo.

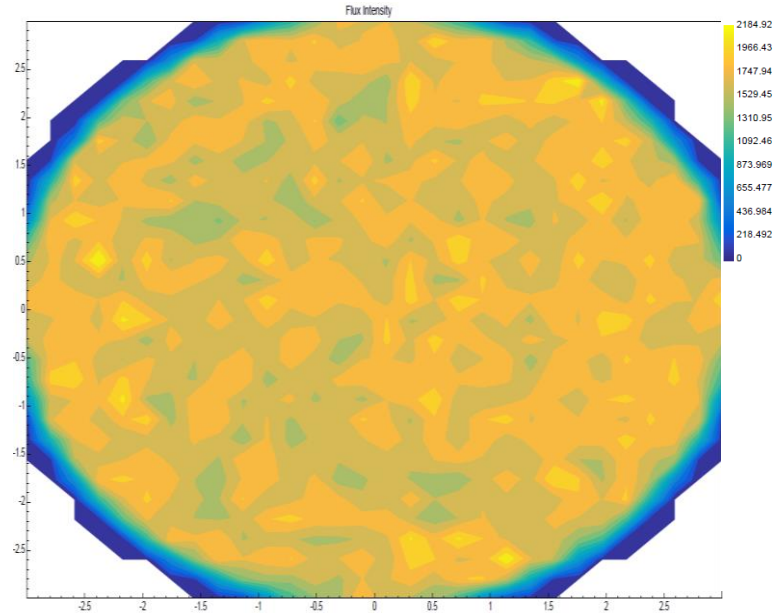


Figura 64: Mapa de flujo de calor del receptor. Fuente: propia.

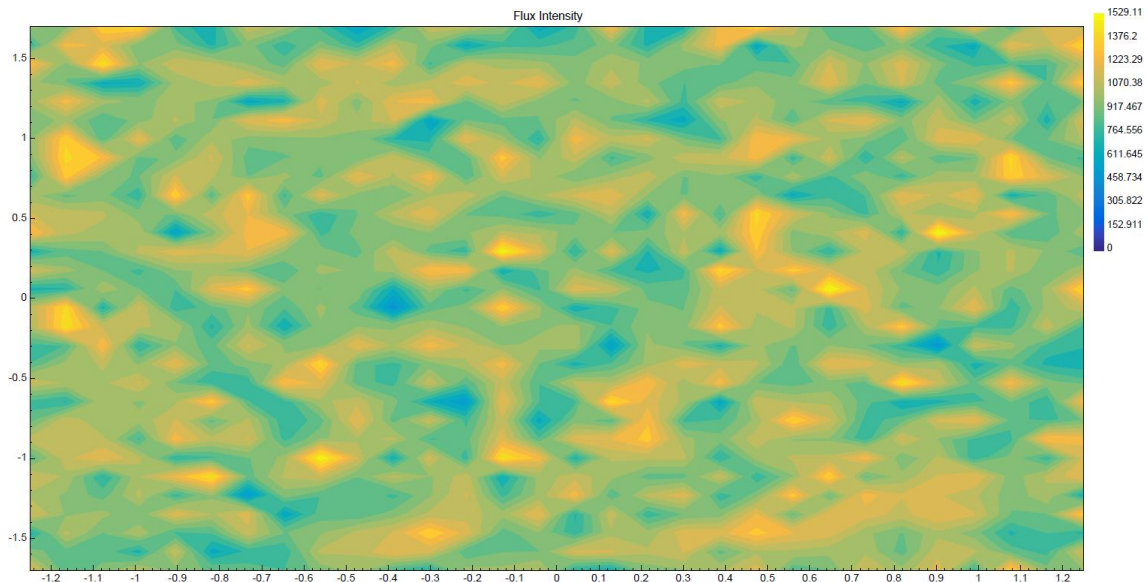


Figura 65: Mapa de flujo de calor de un heliostato. Fuente: propia.

Además, son conocidos los siguientes datos, los cuales son iguales para todos los casos de estudio:

- Área de los heliostatos = 280,5 m<sup>2</sup>
- Área del receptor = 56,55 m<sup>2</sup>
- $\dot{Q}_{sol} = 280,5 \text{ W}$

Por tanto, los mapas de flujo de las ilustraciones anteriores serán exportados a Matlab obteniéndose una matriz con los valores de la potencia en cada punto de la superficie del receptor que se representa en la figura 66, permitiendo ver como varía la potencia sobre la superficie del receptor. Según se produce el desplazamiento del hiperboloide de revolución el mapa de colores cambia, mostrándose en colores fríos los lugares del receptor donde menos potencia se obtiene y en colores cálidos los valores más altos.

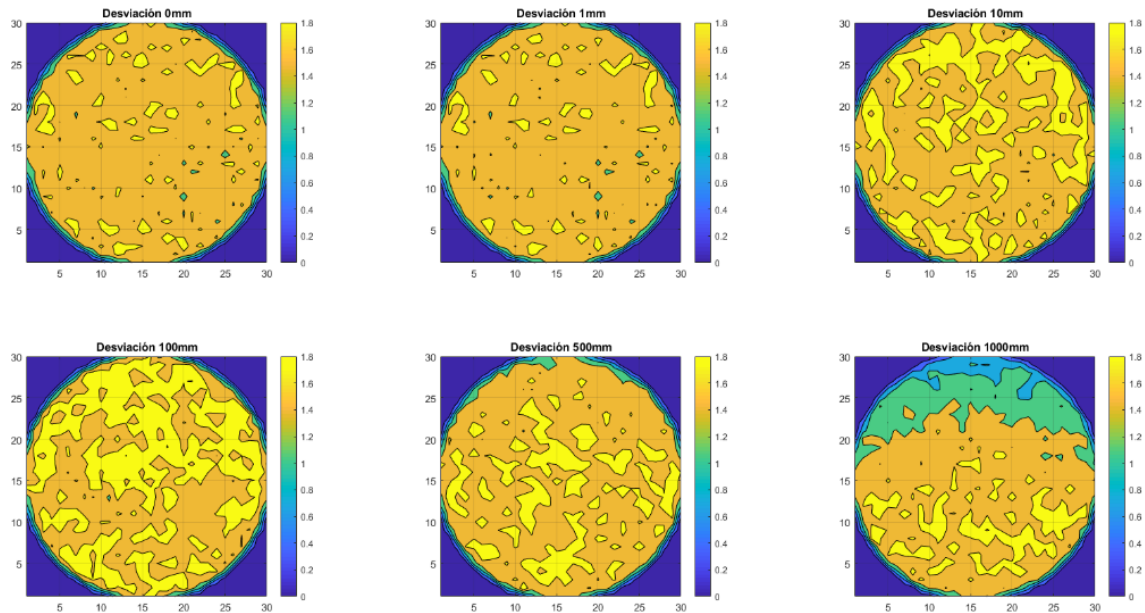


Figura 66: Variación de la potencia respecto al desplazamiento. Fuente: propia.

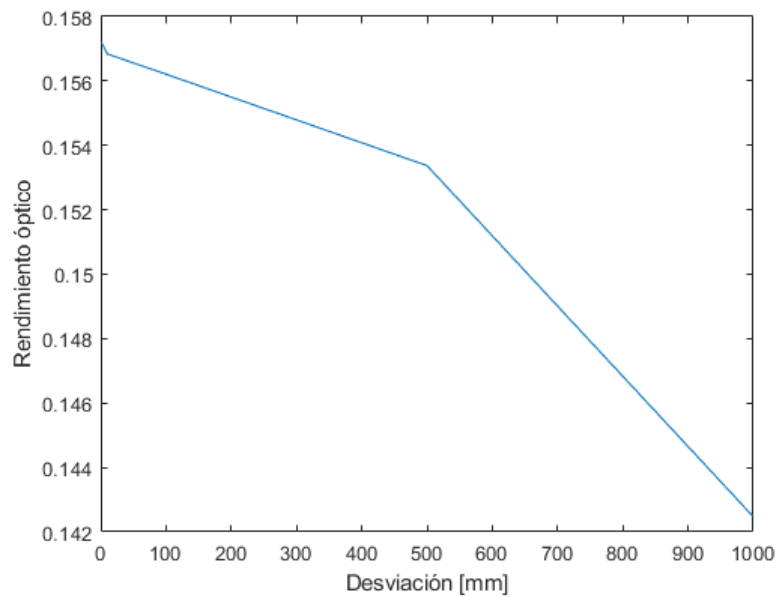
Estos valores serán integrados para conseguir la  $\dot{Q}_{receptor}$ . De esta manera, en la tabla 6 se recogerán los datos de potencia, concentración geométrica, rendimiento óptico y factor de concentración para cada uno de los casos de estudio propuesto según varía la desviación de la parte superior de la estructura.



Tabla 6: Resultados del estudio óptico. Fuente: propia.

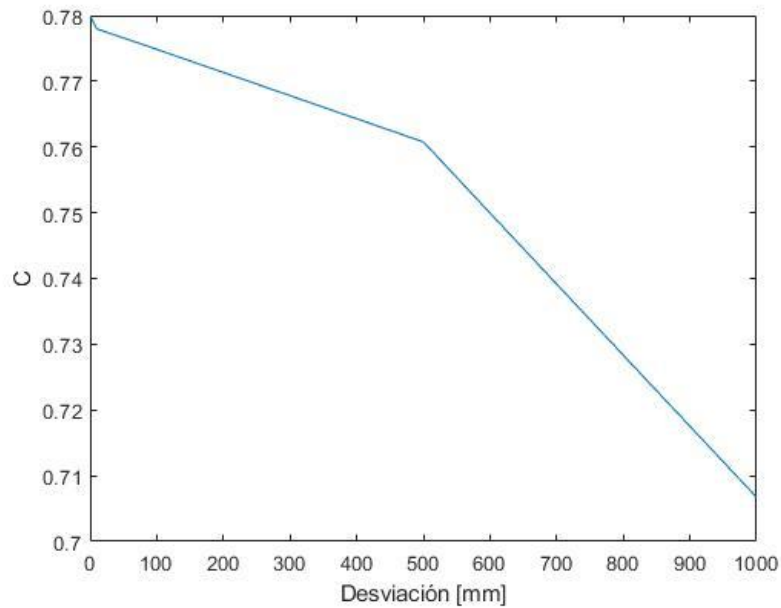
Desviación [mm]	$\dot{Q}_{receptor}$ [W]	$C_g$	$\eta_{\text{óptico instalación}}$	$C$
0	44,088	4,96	0,1572	0,7796
1	44,092	4,96	0,1572	0,7797
10	43,993	4,96	0,1568	0,7780
100	43,817	4,96	0,1562	0,7749
500	43,020	4,96	0,1534	0,7608
1000	39,963	4,96	0,1425	0,7067

Para poder analizar mejor los resultados obtenidos se ha creído conveniente realizar una representación gráfica en Matlab del rendimiento óptico (gráfica 1) y del factor de concentración (gráfica 2)



Gráfica 1: Rendimiento óptico vs Desviación. Fuente: propia.





Gráfica 2: Factor de concentración vs Desviación. Fuente: propia.

Se puede concluir que el desplazamiento por la acción del viento o un error de montaje de unos pocos milímetros en el reflector secundario no produciría grandes variaciones en el funcionamiento de la planta, pero hay que tener presente que, con distancias mayores, ambos parámetros decaen rápidamente llegando a perder más de un 1% de rendimiento en el primer metro de desviación.

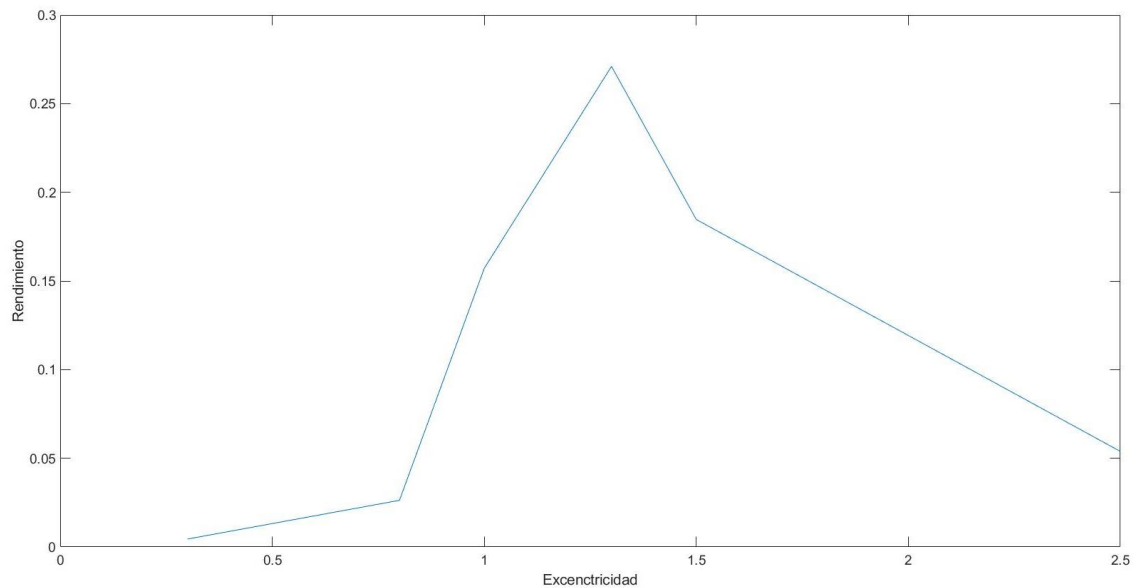
## 6.6. Optimización dimensiones reflector secundario

Como el valor del rendimiento obtenido no es muy elevado, se llevará a cabo una optimización del reflector secundario para comprobar si se pueden conseguir unos valores de rendimiento más elevados variando las dimensiones de este y, para ello, se ha seguido el mismo procedimiento que para obtener la gráfica 1. Se ha decidido variar el valor de la excentricidad entre unos valores de 0,3 y 2,5, a menor valor de excentricidad más pronunciado será el vértice del hiperboloide y a mayor valor tendrá una forma más plana, obteniéndose los rendimientos de la tabla 7.

Tabla 7: Valores de los rendimientos para distintas excentricidades. Fuente: propia.

<u>Excentricidad</u>	<u>Rendimiento óptico [%]</u>
0,3	0,45
0,8	2,63
1	15,72
1,3	27,1
1,5	18,46
2,5	5,39

Representándose los valores anteriores, se obtiene la gráfica 3.



Gráfica 3: Rendimiento vs Excentricidad. Fuente: propia.

Como se puede observar, con valores extremos de excentricidad los rendimientos que se obtienen son muy pequeños, por lo tanto, para un diseño final de la planta en el que se busque un rendimiento elevado no se podrían usar esas geometrías ya que la reflexión de los rayos que se obtienen de ellos no es la adecuada.

Por otro lado, el pico de rendimiento se obtiene con una excentricidad de 1,3, consiguiendo un 27,1%. Por lo tanto, se podría mejorar el funcionamiento de la central usando la excentricidad mencionada y redimensionando el hiperboloide.

Para los estudios que se han realizado en este proyecto, la excentricidad de valor 1 puede ser usada ya que permite observar adecuadamente cómo se comporta la planta ante las variaciones discutidas en los resultados.

## 6.7. Estudio térmico

Con este último epígrafe de la presentación de los resultados obtenidos, se quiere dar solución al estudio térmico planteado matemáticamente en el apartado 3.6 del presente informe. En primer lugar, es necesario recordar los datos que ya fueron presentados en el apartado mencionado:

- Son conocidas la temperatura exterior, que será 45°C (media máxima anual) y 25°C (media mínima anual) y la temperatura interior que se ha supuesto como 5°C superior a la temperatura exterior como primera aproximación.
- El espesor del espejo será de 30cm y la superficie se simplificará como el área de una esfera de diámetro igual al valor de la apertura del hiperboloide.
- El coeficiente convectivo del aire exterior será de  $h_{\text{exterior}} = 10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  y el del aire interior del hiperboloide de  $h_{\text{interior}} = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .
- El coeficiente de conducción del vidrio, material del cual están hechos los espejos, se ha tomado como  $k_{\text{aluminio}} = 1 \text{ W/mK}$ .

Para poder resolver el sistema de ecuaciones que se plantea en el apartado 3.6 faltan dos resultados que son: el rendimiento de los heliostatos y la potencia térmica que suministran.

$$\eta_{\text{óptico heliostatos}} = 0,8428 = 84,28\%$$

$$\dot{Q}_{\text{heliostatos}} = 236,41 \text{ kW}$$

Conociendo el valor de la potencia de los heliostatos se puede realizar el siguiente apunte. Si se observan los valores de  $\dot{Q}_{\text{sol}} = 280,5 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_{\text{heliostatos}} = 236,41 \text{ kW}$  y  $\dot{Q}_{\text{receptor}} = 44,09 \text{ kW}$ , se puede ver como las pérdidas de energía solar aumentan con el número de reflexiones, tanto por la estructura simplificada usada en el reflector secundario como pérdidas por reflexión como se mencionó en los fundamentos teóricos de las plantas Beam-Down.

Finalmente, se puede averiguar la diferencia de temperaturas presente en el espejo del hiperboloide de revolución.

- Para la media anual máxima, 45°C:

$$T1 = 457,80 \text{ K} = 184,80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 376,92 \text{ K} = 103,92 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = T1 - T2 = 80,88 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Para la media anual mínima, 25°C:

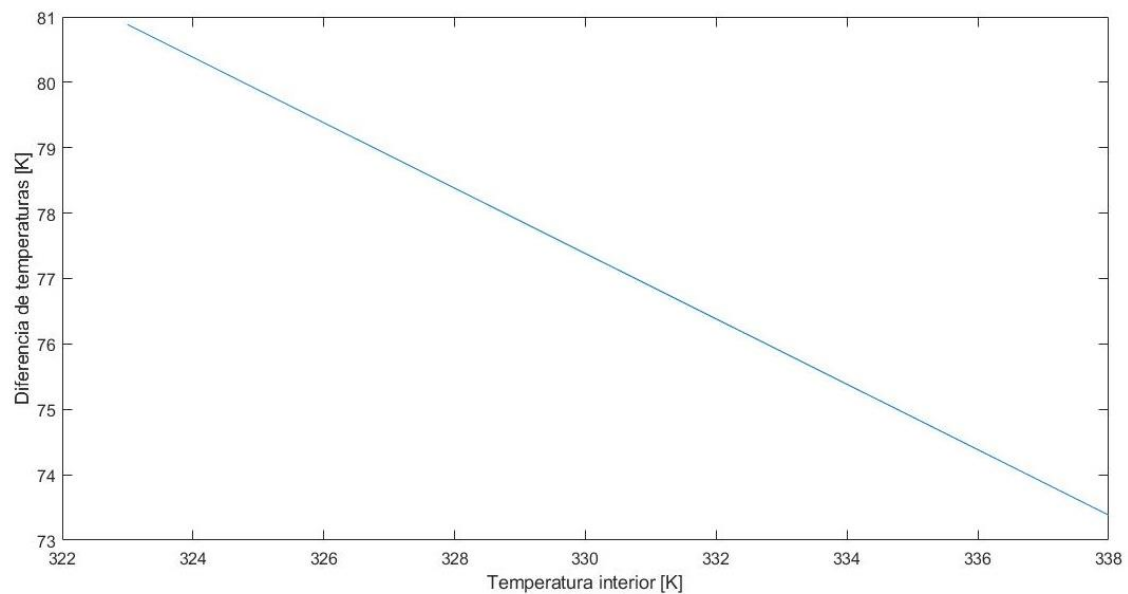
$$T1 = 437,80 \text{ K} = 164,80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 356,92 \text{ K} = 83,92 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

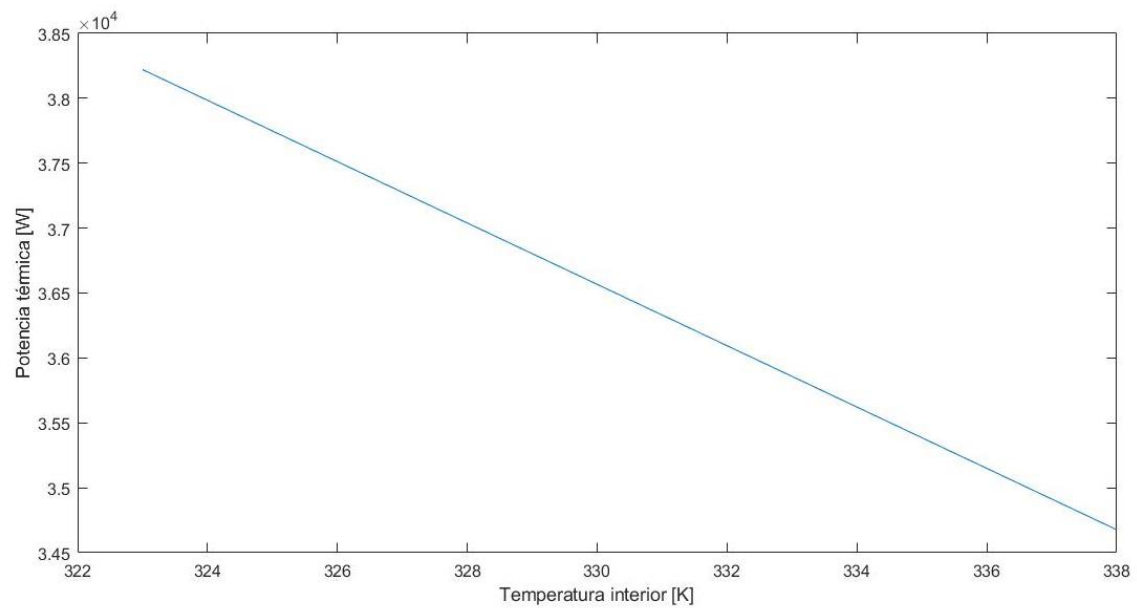
$$\Delta T = T1 - T2 = 80,88 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

La diferencia de temperaturas es la misma en los dos casos ya que la suposición hecha para la hallar la temperatura interior, también es igual para los dos casos, pero se puede observar que las temperaturas en las superficies del espejo son menores en el segundo caso, reduciéndose así el riesgo de rotura del cristal.

Como ya se conoce el valor de la diferencia de temperatura para las condiciones en las que se ha realizado el proyecto, se van a obtener la diferencia de temperatura (gráfica 4) y la potencia térmica (gráfica 5) para diferentes suposiciones de temperatura interior, en el caso de la media anual máxima al ser la época en la que mayor riesgo de fallo de los espejos existe.



Gráfica 4: Diferencia de temperaturas vs Temperatura interior. Fuente: propia.



Gráfica 5: Potencia térmica vs Temperatura interior. Fuente: propia.

Como era de esperar, al aumentar la temperatura interior ambiente del hiperboloide de revolución, la temperatura de la cara interior aumenta, reduciéndose de esta manera la diferencia de temperaturas entre las caras.

Por otro lado, también se puede apreciar un comportamiento lineal decreciente en la potencia térmica del interior de la estructura debido a este aumento de la temperatura de la superficie interior.

## 7. MARCO REGULADOR

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, la planta estudiada se encuentra en Masdar, Abu Dabi, esto quiere decir que la instalación debe estar sujeta al marco regulador vigente en este país. Al ser una instalación dedicada a la investigación no existe una normativa aplicable y, por esa razón, se han recogido las normas españolas y estadounidenses como modelo, para tener una idea del marco regulador que se podría utilizar [37].

- Hay que destacar que en España cada comunidad autónoma crea su propia normativa sobre la instalación y mantenimiento de la energía solar, así como para otras energías renovables como puede ser la eólica. Aun así, existen normas a nivel nacional para algunos conceptos como pueden ser:
  - UNE-EN 61725:1998 que recoge la expresión analítica para los perfiles solares diarios.
  - UNE-EN ISO 9488:2001 que recoge todo lo relativo a la energía solar.
  - A parte, podría ser de utilidad la norma UNE 206010:2015 donde se habla de las prestaciones que tienen que ofrecer las centrales termosolares de tipo cilindro-parabólico que, aunque no tienen la misma estructura que los sistemas Beam-Down la forma de funcionamiento es similar [26].
- Marco regulador si la planta se hubiese situado en Estados Unidos:
  - US20110197584A1 que trata únicamente sobre los detalles de la torre Beam-Down.
  - US20120186251A1 habla sobre el modelo de planta termosolar Beam-Down al completo, no únicamente de la torre como en la norma anterior.

## 8. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

### 8.1. Presupuesto

En este apartado del proyecto se llevará a cabo el cálculo del coste de la realización de este proyecto, comenzando por los recursos materiales, recursos de personal, gastos, costes directos e indirectos y finalmente el beneficio industrial con el IVA correspondiente.

Para completar los cálculos es necesario utilizar la ecuación 21, con la que se obtendrá el coste imputable, es decir, el coste final de los materiales.

$$\text{Coste imputable} = \frac{\text{Precio total}}{\text{Periodo de depreciación}} \cdot \text{Uso del material} \quad (21)$$

En la tabla 8 se recoge el coste de cada material y el precio final de todos ellos:

Tabla 8: Coste material del proyecto.

<u>Materiales</u>	<u>Precio total</u> [€]	<u>Uso del material</u> [meses]	<u>Periodo de depreciación</u> [meses]	<u>Coste imputable</u> [€]
Ordenador de sobremesa	1200	11	48	275
Matlab R2018a	0	10	-	0
SolTrace	0	2	-	0
Solid Edge ST10	0	2	-	0
Office 365	0	11	-	0
<u>TOTAL</u>				275

El precio de los materiales utilizados es de 275 €, hay que destacar que los precios de las licencias de los programas son 0 € debido a que la licencia de SolTrace es gratuita y el resto de licencias son suministradas sin coste por la universidad. El precio de las licencias sin los convenios de la universidad sería de:

- Matlab: 2000€ licencia permanente, 800 € licencia anual.
- Solid Edge ST10: 102 €/mes.
- Paquete Office 365: 149 € versión estudiante, 299 € versión empresas y 579 € versión profesional.

Para poder realizar el cálculo del coste personal es necesario conocer el número de horas dedicadas al proyecto:

- Ingeniero:
  - 7 horas/semana del 1 de Julio hasta el 1 de noviembre de 2018.
  - 20 horas/semana del 1 de febrero al 1 de junio de 2019.
- Doctor supervisor: dudas vía email y tutorías 25 horas.

Con estos datos se puede calcular el coste personal del proyecto, que se muestra en la tabla 9:

*Tabla 9: Coste de mano de obra del proyecto.*

<u>Nombre y apellidos</u>	<u>Categoría</u>	<u>Horas dedicadas</u>	<u>Coste horario [€/hora]</u>	<u>Coste total [€]</u>
Ángel Huertas Galdín	Ingeniero	432	12	5184
Jesús Gómez Hernández	Doctor	25	36	900
<b><u>TOTAL</u></b>				6084

Ahora se puede completar el cálculo del presupuesto ya que, los costes directos, son la suma de los costes materiales y los costes de mano de obra, y el resto de costes se calculan aplicando los porcentajes fijados en el Artículo 131 del Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas [37]. Todo esto se muestra en la tabla 10.



Tabla 10: Coste final.

<u>Tipo de coste</u>	<u>Porcentaje</u>	<u>Coste [€]</u>
Coste de materiales	-	275
Coste de mano de obra	-	6084
Costes directos	-	6359
Costes generales	13% de los costes directos	826,67
<b>Subtotal 1</b>		7185,67
Beneficio industrial	6% del subtotal 1	431,14
<b>Subtotal 2</b>		7616,81
IVA	21% del subtotal 2	1599,53
<b>TOTAL</b>		<b>9216,34</b>

## 8.2. Impacto socio-económico

Una vez tratados todos los temas de este proyecto, es conveniente de hablar del impacto que este genera en la sociedad y en la economía del lugar.

Para empezar, desde el punto de vista económico se encuentran dos análisis posibles. A nivel local, la energía producida mediante energía solar cada vez es más barato, lo que supondrá una disminución del precio de la electricidad en la localidad y, por tanto, un ahorro considerable en las facturas de sus habitantes. Por otro lado, desde el enfoque de la central, debido a las altas temperaturas y las condiciones desérticas en las que se trabaja, si no se adopta la solución propuesta en el proyecto en cuanto a la temperatura de los espejos, estos pueden estropearse generando gastos extra para la empresa que lleva el proyecto.

Medioambientalmente, el uso de este tipo de centrales es una ventaja en todos los aspectos ya que no produce emisiones, es respetuosa con el medio ambiente, se aprovecha de una energía renovable y limpia, entre otras muchas ventajas. Uno de los pocos inconvenientes que puede existir es estructuralmente ya que, debido a las dimensiones de la planta, puede producir impacto visual en la naturaleza, desaparición o desplazamiento de la fauna local en el lugar que ocupa la central, aunque debería respetarse el entorno a la hora de situarla, o problemas derivados de un mal tratamiento de los residuos del

receptor o por el propio funcionamiento de la instalación, que afecten a los habitantes del lugar o al medio ambiente.

Los resultados y conclusiones obtenidos en este informe pueden ser de utilidad para otras investigaciones, como es el caso del proyecto de Tatsuya Kodama, ya mencionado con anterioridad, “*Particle reactor technology for thermochemical fuel conversion*” [38]. En él, se proponen tres configuraciones diferentes en las que se usaría como combustible  $H_2O$ , carbón o gas natural, siendo el primer modelo una energía totalmente solar y las otras dos mezclando energía renovable y energías convencionales, para obtener  $H_2$  y  $CO$  que se usaría como combustible, por ejemplo, para barcos.

Como las temperaturas necesarias para llevar a cabo estas reacciones químicas son elevadas:  $H_2O$  ( $1400^{\circ}C$ ), carbón ( $1100^{\circ}C$ ) y gas natural ( $850^{\circ}C$ ), se propone usar los sistemas Beam-Down para concentrar toda la energía solar en el receptor, donde se encontraría alguno de estos combustibles, pudiéndose alcanzar las temperaturas deseadas.

## 9. CONCLUSIONES

Una vez expuestos todos los procedimientos y resultados anteriores, se han obtenido las siguientes conclusiones.

En cuanto al diseño y dimensionalización de la planta, aunque se ha realizado una dimensionalización lo más aproximada posible con la central real de Masdar, se tuvieron que llevar a cabo una serie de simplificaciones que, a la vista de los resultados obtenidos, han resultado de utilidad y han proporcionado unos datos razonables.

Como se ha podido observar, la dimensionalización del hiperboloide de revolución resulta aceptable, aunque hay que considerar que se podría realizar una optimización de las dimensiones del elemento para conseguir un mayor rendimiento óptico. Podría ser interesante de cara a futuros proyectos buscar una representación más fiel a la realidad del reflector secundario, ya sea optimizando las dimensiones de este o cambiando su configuración y usar múltiples espejos enfocados a cada uno de los receptores, como ocurre en la planta real.

Del estudio óptico de la central, se puede concluir que una variación de pocos milímetros en la posición del reflector secundario no produciría variaciones muy significativas en el funcionamiento de la planta, desplazamiento que se podría producir por la propia acción del viento. Pero sí hay que destacar que, variaciones más notables de la posición de la estructura sí afectarían al rendimiento de la instalación, ya que se estaría desplazando el foco superior haciendo que los rayos no impactasen de forma adecuada con el receptor.

Otra posibilidad para nuevos trabajos sería estudiar como varía el rendimiento ante desviaciones en la inclinación, orientación y coordenadas en las que se encuentran los heliostatos, u oscilaciones de los mismos provocadas por las rachas de viento del desierto.

En el estudio térmico de la central se pudo determinar las elevadas temperaturas a las que se enfrenta el espejo de la parte superior del Beam-Down durante todo el año, ya que, aunque se hicieron los cálculos para la media anual máxima y mínima, los valores no variaban en exceso, manteniéndose muy elevados y siendo la diferencia de temperatura la misma debido a la suposición realizada.

Se comprobó que, cambiando la suposición hecha para la temperatura interior, tanto la potencia térmica como la diferencia de temperaturas obtenidas tenían un comportamiento lineal, tendiendo a decrecer debido a que la temperatura de la cara interior del espejo ascendía, pudiendo solo descender si la temperatura interior era inferior que la temperatura ambiente.

Esto solo es posible refrigerando la zona interior del hiperboloide de revolución, abriéndose de esta manera una nueva línea de investigación hacia nuevas metodologías de refrigeración o como adaptar las ya existentes a esta estructura, reduciendo de esta manera el riesgo de que se estropeeé este elemento.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Masdar», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Masdar&oldid=103332299>, [Accedido 11-nov-2017].
- [2] «Google Maps», *Google Maps*. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Masdar+-+Abu+Dabi+-+Emiratos+%C3%81rabes+Unidos/@24.4264395,54.6017503,14z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x3e5e48a369f3f1f1:0x2c78fcb77107ce5b!8m2!3d24.4266734!4d54.614979>. [Accedido: 26-may-2019].
- [3] N. Calvet, M. Martins, B. Grange, V. G. Perez, D. Belasri, M. T. Ali y P. R. Armstrong, «The Masdar Institute solar platform: A new research facility in the UAE for development of CSP components and thermal energy storage systems», *AIP Conference Proceedings*, vol. 1734, nº 100003, 2016.
- [4] «BP Statistical Review | Informes y publicaciones | Conozca BP | BP España», *bp.com*. [En línea]. Disponible en: [https://www.bp.com/es\\_es/spain/conozca-bp/informes-y-publicaciones/bp-statistical-review.html](https://www.bp.com/es_es/spain/conozca-bp/informes-y-publicaciones/bp-statistical-review.html). [Accedido: 18-abr-2019].
- [5] «Abu Dhabi adjudica la planta de energía solar más grande del mundo», *El Correo del Golfo*, 25-may-2017. [En línea]. Disponible en: <https://elcorreo.ae/economia/abu-dhabi-adjudica-planta-energia-solar-mas-grande-mundo>. [Accedido: 18-abr-2019].
- [6] «Radiación electromagnética», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiaci%C3%B3n\\_electromagn%C3%A9tica&oldid=114602201](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica&oldid=114602201), [Accedido: 15-mar-2019].
- [7] P. A. Rodríguez Aumente y C. S. Vereda Ortiz, «Instalaciones de energías renovables, Energía Solar», *Apuntes de la asignatura Instalaciones de energías renovables, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid*, 2017-2018.
- [8] «Radiación directa, difusa y reflejada», *Arquitectura y Diseño*, [En línea], Disponible en: <https://pedrojhernandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/> [Accedido 08-mar-2014].
- [9] «¿Qué beneficios tiene la energía solar? | ACCIONA». [En línea]. Disponible en: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/>. [Accedido: 18-abr-2019].
- [10] P. Rivas, «Energía Solar Térmica ¿Cómo funciona? Lo entenderás todo.», *Instalaciones y Eficiencia Energética*, [En línea], Disponible en: <https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/como-funciona-la-energia-solar-termica/>. [Accedido: 11-nov-2016].
- [11] «Energía solar fotovoltaica y su contribución | ACCIONA». [En línea]. Disponible en: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>. [Accedido: 18-abr-2019].

- [12] «¿Cómo hacer más productiva la tierra con paneles solares?», *Paneles solares para empresas y explotaciones agrícolas*, [En línea], Disponible en: <https://powen.es/blog/paneles-solares/>. [Accedido: 29-oct-2018].
- [13] «Ventajas e inconvenientes de la energía solar fotovoltaica», *Anbelo Solar*, [En línea], Disponible en: <http://www.anelosolar.com/ventajas-e-inconvenientes-de-la-energia-solar-fotovoltaica/>. [Accedido: 17-ene-2018].
- [14] «La energía termosolar de concentración: una alternativa viable», *Grupo Sinelec*, [En línea], Disponible en: <https://gruposinelec.com/la-energia-termosolar-de-concentracion-una-alternativa-viable/>. [Accedido: 20-mar-2018].
- [15] «Energía termosolar de concentración», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [En línea], Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Energ%C3%ADa\\_termosolar\\_de\\_conce ntraci%C3%B3n&oldid=115370031](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Energ%C3%ADa_termosolar_de_conce ntraci%C3%B3n&oldid=115370031). [Accedido: 19-abr-2019].
- [16] Á. G. F. Díaz-Carralero, «Estudios físico-químicos y de corrosión a elevada temperatura para el diseño de nuevos fluidos almacenadores de energía en centrales solares de concentración», Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2013. [En línea], Disponible en: <https://eprints.ucm.es/22413/1/T34597.pdf>. [Accedido: 11-abr-2019]
- [17] P. A. Rodríguez Aumente y C. S. Vereda Ortiz, «Instalaciones de energías renovables, Plantas Termosolares», Apuntes de la asignatura Instalaciones de energías renovables, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, 2017-2018.
- [18] «Centrales de C.Cilindro Parabólico». [En línea]. Disponible en: <http://www.centrales termosolares.com/centrales-de-c-cilindro-parabolico>. [Accedido: 28-abr-2019].
- [19] «¿Qué es una central termosolar de concentrador cilindro parabólico?» [En línea]. Disponible en: <http://www.santiagogarciagarrido.com/index.php/85-central-termosolar-de-concentrador-cilindro-parabolico>. [Accedido: 28-abr-2019].
- [20] «Renovetec Ingeniería: Plantas Fresnel». [En línea]. Disponible en: <http://www.renovetecingenieria.com/termosolar/plantafresnel.html>. [Accedido: 28-abr-2019].
- [21] «¿Puede superar la Fresnel a la cilindroparabólica? | CSP Today Español». [En línea]. Disponible en: <http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/%C2%BFpuede-superar-la-fresnel-la-cilindroparab%C3%B3lica>. [Accedido: 28-abr-2019].
- [22] «El crecimiento de la energía solar en India liderado por la FV pone la mirada en los proyectos CSP | New Energy Update». [En línea]. Disponible en: <http://newenergyupdate.com/csp-es/el-crecimiento-de-la-energia-solar-en-india-liderado-por-la-fv-pone-la-mirada-en-los>. [Accedido: 26-may-2019].
- [23] «Discos Stirling», *themorningstarg2*, [En línea], Disponible en: <https://themorningstarg2.wordpress.com/2012/03/31/discos-stirling/>. [Accedido: 31-mar-2012].

- [24] «El problema con la termosolar de disco Stirling | CSP Today Español». [En línea]. Disponible en: <http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/el-problema-con-la-termsolar-de-disco-stirling>. [Accedido: 03-may-2019].
- [25] B. Grange, V. Kumar, A. Gil, P. R. Armstrong, D. S. Codd, A. Slocum y N. Calvet. «Preliminary optical, thermal and structural design of a 100 kW CSPonD beam-down on-sun demonstration plant», 7<sup>th</sup> International Conference on Applied Energy- ICAE2015.
- [26] D. Gómez González, «Estudio de la distribución de energía en un campo Fresnel-Beam-Down», Trabajo de Fin de Grado, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [27] T. Wendelin y A. Dobos, «SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems», Technical Report, NREL/TP-5500-59163, Octubre 2013.
- [28] «Clima Abu Dabi», *meteoblue*. [En línea]. Disponible en: [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/modelclimate/abu-dabi\\_emiratos-%c3%81rabes-unidos\\_292968](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/modelclimate/abu-dabi_emiratos-%c3%81rabes-unidos_292968). [Accedido: 20-feb-2019].
- [29] «Las leyes de reflexión de la luz - formación de la imagen», *Electrónica analógica y digital*, [En línea], Disponible en: <http://www.electrontools.com/Home/WP/2017/11/24/las-leyes-de-reflexion-de-la-luz/>. [Accedido: 24-nov-2017].
- [30] J. Fabian Feldhoff , «Linear Fresnel Collectors», [En línea], Disponible en: [http://sfera.sollab.eu/downloads/Schools/Fabian\\_Feldhoff\\_Linear\\_Fresnel.pdf](http://sfera.sollab.eu/downloads/Schools/Fabian_Feldhoff_Linear_Fresnel.pdf). [Accedido: 11-mar-2019].
- [31] «Power From The Sun :: Chapter 10». [En línea]. Disponible en: <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter10/chapter10.html>. [Accedido: 11-mar-2019].
- [32] Hilbert, D. and Cohn-Vossen, S., *Geometry and the Imagination*. New York: Chelsea, 1999.
- [33] S. Taramona y J. Gómez-Hernández, «Designing a linear beam-down secondary concentrator», XI Congreso Nacional y II Internacional de Ingeniería Termodinámica.
- [34] «Polinomios de Zernike», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [En línea], Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Polinomios\\_de\\_Zernike&oldid=110882015](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Polinomios_de_Zernike&oldid=110882015). [Accedido: 26-sep-2018].
- [35] «Tema 8. Transferencia de calor por radiación», Apuntes de la asignatura Transferencia de Calor, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, 2017-2018.
- [36] «Cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar en cualquier momento». [En línea]. Disponible en:

[https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=es](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es). [Accedido: 31-jul-2018].

- [37] R. Martín Blasco, «Estudio del reflector secundario en un sistema Beam-Down», Trabajo de Fin de Grado, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [38] T. Kodoma « Particle reactor technology for thermochemical fuel conversion», H2020 Sun to Liquid Scientific Workshop, Octubre 2018, IMDEA Energy Institute, Madrid, España.

## ANEXO

```
% Angulos solares %
% Angulo horario (13:23, sol en el punto más alto) %
hora = 13.23;
w = 15*(hora-12);
% Declinacion [°] (21junio) %
n = 172; %suma de dias%
d = 23.45*sind((360/365)*284+n);
% Latitud Abu Dabi [°] %
lat = 24.416667;
long = 54.616667;
% Angulo cenital [°] %
theta_z = acosd(cosd(d)*cosd(lat)*cosd(w)+sind(d)*sind(lat));
% Angulo azimutal [°] %
alt_sol = 90-theta_z;
az = acosd((sind(d)*cosd(lat)-
cosd(d)*cosd(w)*sind(lat))/cosd(alt_sol));

% Angulo 2D heliostatos %
% Fila A %
alt_foco = 20.3; alt_hel = 1.5;
h = 20.3-1.5; r_A = 8.74;
alpha_A = atand(h/r_A); gamma_A = 90-alpha_A;
beta_A = gamma_A/2;
% Fila B %
r_B = 13.54;
alpha_B = atand(h/r_B); gamma_B = 90-alpha_B;
beta_B = gamma_B/2;
% Fila B %
r_C = 18.34;
alpha_C = atand(h/r_C); gamma_C = 90-alpha_C;
beta_C = gamma_C/2;

% Posición de los espejos x,y,z [m] %
% Radio A %
A1=[4.37,-7.569,1.5];
A2=[8.74,0,1.5];
A3=[4.37,7.569,1.5];
A4=[-4.37,7.569,1.5];
A5=[-8.74,0,1.5];
A6=[-4.37,-7.569,1.5];
% Radio B %
B1=[4.631,-12.723,1.5];
B2=[8.703,-10.372,1.5];
B3=[11.726,-6.77,1.5];
B4=[13.334,-2.351,1.5];
B5=[13.334,2.351,1.5];
B6=[8.703,10.372,1.5];
B7=[4.631,12.723,1.5];
B8=[0,13.54,1.5];
B9=[-4.631,12.723,1.5];
B10=[-8.703,10.372,1.5];
B11=[-13.334,2.351,1.5];
B12=[-13.334,-2.351,1.5];
B13=[-11.726,-6.77,1.5];
B14=[-8.703,-10.372,1.5];
B15=[-4.631,-12.723,1.5];
% Radio C %
C1=[4.747,-17.715,1.5];
C2=[12.968,-12.968,1.5];
```



```

C3=[17.715,-4.747,1.5];
C4=[17.715,4.747,1.5];
C5=[12.968,12.968,1.5];
C6=[4.747,17.715,1.5];
C7=[-4.747,17.715,1.5];
C8=[-12.968,12.968,1.5];
C9=[-17.715,4.747,1.5];
C10=[-17.715,-4.747,1.5];
C11=[-12.968,-12.968,1.5];
C12=[-4.747,-17.715,1.5];

% Hiperbola %
F1 = 20.3; %Altura foco 1 [m]%
F2 = 2; %Altura foco 2 [m]%
exc = 1;
Hfocus=(F1-F2);
c=Hfocus/2;
a=(exc*Hfocus)-c;
b=a;
%y0=c+a;

% Ajuste del hiperboloide %
y=linspace(-4.75,4.75); % Amplitud de la hiperbola 4.75 %
x=linspace(-4.75,4.75);
[x,y] = meshgrid(x,y);
z=c*sqrt(((x.^2)/a^2)+((y.^2)/b^2)+1);
surf(x,y,z);
rotate3d;
hold on
% Polinomio de Zernike %
% B00 + B10*y + B11*x + B20*y^2 + B21*x*y + B22*x^2 %
cftool

```